

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Государственный комитет Российской Федерации
по высшему образованию
Уральский государственный технический университет — УПИ

С. С. АНАНИЧЕВА П. И. БАРТОЛОМЕЙ
А. Л. МЫЗИН

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ

*Утверждено редакционно-издательским советом института
в качестве учебного пособия*

Научный редактор проф., д. т. н. **Л. Л. Богатырев**

Екатеринбург
1993

Авторы: **С. С. Ананичева, П. И. Бартоломей,
А. Л. Мызин.**

Передача электроэнергии на дальние расстояния:
Учебное пособие/С. С. Ананичева, П. И. Бартоломей,
А. Л. Мызин. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 1993, 80 с.

Изложены технические, экономические и экологические проблемы передачи электроэнергии на дальние расстояния по линиям переменного и постоянного тока. Рассмотрены режимы работы дальних линий электропередач и способы увеличения их пропускной способности. Теоретическое изложение сопровождается числовыми примерами, что способствует самостоятельному усвоению материала студентами.

Предназначено для студентов очного и заочного обучения по специальности 10.01 — Электрические станции, 10.02 — Электроэнергетические системы и сети, 21.04 — Автоматическое управление электроэнергетическими системами, слушателей факультетов повышения квалификации по тем же специальностям, может быть использовано в научно-исследовательской работе студентов.

Рис. 46. Табл. 6. Библиогр. 5 назв.

Рецензенты: кафедра АСЭС СИПИ;
зам. главного инженера Энергосетьпроекта **Ю. А. Коржавин**

ISBN 5—230—17081—6

© Уральский государственный
технический университет —
УПИ, 1993

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетические системы во всех странах мира, в том числе и в СНГ, развивались и продолжают развиваться от изолированных локальных систем, питающих местные нагрузки, к мощным энергообъединениям, связывающим электрические станции и потребителей в сеть переменного тока. На определенном этапе в силу некоторых технико-экономических преимуществ появились передачи постоянного тока. Объединение энергосистем на параллельную работу объективно обусловлено рядом причин, среди которых главными являются следующие:

1. Возможность взаимного резервирования, что приводит к повышению надежности энергоснабжения. При этом резервная мощность в объединенной энергосистеме (ОЭС) меньше, чем их сумма в разрозненных энергосистемах.

2. Обеспечение транспорта электрической энергии вместо транспорта топлива по железной дороге, нефте- и газопроводам, что в ряде случаев оказывается экономически более оправданным. Дело в том, что месторождения дешевых видов топлива и расположение гидроэнергетических ресурсов, как правило, не совпадают с центрами промышленного развития и потребления электроэнергии. Например, в СНГ около 75% всего промышленного потенциала и населения сосредоточено в Европейской части страны и на Урале, а 80% энергоресурсов сосредоточено в Сибири и Средней Азии.

3. Суммарная установленная мощность в ОЭС может быть существенно меньше, чем сумма максимумов электропотребления в отдельных ЭЭС. Особенно этот эффект проявляется при объединении систем, расположенных в разных часовых поясах. Энергосистемы Центра, Урала и Сибири получают возможность отдавать избыточную мощность в ночное время и покрывать свою нагрузку в дневные часы максимума за счет соседних энергосистем.

4. Снижение суммарных затрат на выработку и передачу электроэнергии за счет экономического распределения нагрузки между параллельно работающими электростанциями.

Преимущества связей между ЭЭС, а также необходимость передачи электроэнергии от удаленных источников к центрам электропотребления привели к появлению дальних электропередач (ДЭП). Использование атомных электростанций (АЭС) также влияет на развитие энергосистем и строительство ДЭП. Вопросы безопасности при эксплуатации АЭС вынуждают пересмотреть ранее укоренившуюся концепцию покрытия дефицита мощности и строительства АЭС вблизи от центров нагрузки. Приходится считаться с необходимостью выноса АЭС на значительные расстояния от промышленных и населенных районов, что также обуславливает строительство мощных ДЭП.

В пособии рассмотрены методы анализа и расчета режимов работы ДЭП, обладающих рядом особенностей, связанных с необходимостью учета волновых процессов в них [1].

Глава 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

1.1. Энергетическая характеристика дальних электропередач

Под ДЭП будем понимать линию электропередачи (ЛЭП), оснащенную комплексом технических средств, обеспечивающих повышенную пропускную способность и возможность устойчивой параллельной работы отдельных частей ОЭС, несмотря на большие расстояния между ними. Большие длины передач переменного тока приводят к необходимости учета волнового характера процессов, происходящих при передаче электрической энергии. Поскольку на частоте 50 Гц длина электромагнитной полуволны (сдвиг по фазе на 180°) в воздушных линиях (ВЛ) составляет 3000 км, то при длинах свыше 300 км представление ЛЭП в виде четырехполюсника с сосредоточенными параметрами приводит не только к большой погрешности расчетов, но и к качественно неверным выводам. Анализ и расчеты режимов ДЭП должны выполняться с учетом распределенности параметров вдоль линии.

Функционально ДЭП можно подразделить на односторонние и реверсивные передачи. Первые из них используются только для передачи электроэнергии от электростанции к центру потребления, вторые — как межсистемные связи, обеспечивающие возможность перетоков мощности в любом направлении. Чаще всего рациональные односторонние ДЭП постепенно перерастают в межсистемные передачи. Так было с первой ДЭП переменного тока длиной 850 км Куйбышев—Москва (постро-

енной в 1956—1959 гг.), так случилось с ДЭП от Сургутских ГРЭС на Урал и др.

Поскольку ДЭП предназначены для передачи больших мощностей, то стратегически сразу же определилось направление их развития и совершенствования не за счет увеличения тока в линии, а за счет увеличения напряжения передачи. Повышение пропускной способности за счет увеличения силы тока экономически не оправдано, так как приводит либо к увеличению сечения провода, либо к большему числу параллельных цепей в передаче. В любом случае возрастание затрат определяется главным образом расходами на дорогой цветной металл. Увеличение напряжения ДЭП приводит к возрастанию затрат за счет черных металлов (увеличение размеров опор) и изоляции, что в конечном итоге оказывается выгоднее по сравнению с увеличением сечения проводов при одном классе напряжения.

Т а б л и ц а 1.1

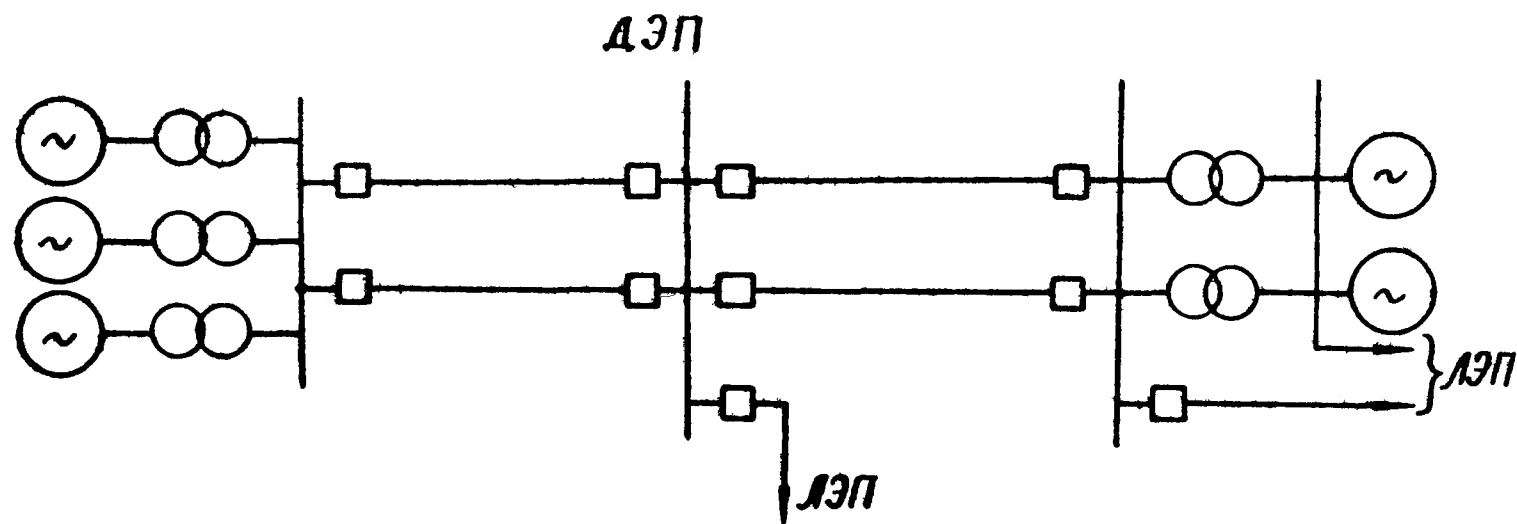
Сопоставление дальних электропередач

Напряже- ние, кВ	Марка провода	Стоимость 1 км цепи, тыс. руб.	Мощность на одну цепь, ГВт	Число цепей на 5 ГВт	Потери (включая корону), о. е.	Стоимость передачи, о. е.
330	АС-400×2	44	0,45	11	3,3	2,8
500	АС-400×3	55,3	1,1	5	2,3	1,63
750	АС-400×5	97	2,5	2	1,5	1,15
1150	АС-330×8	170	5,1	1	1	1

Сказанное хорошо иллюстрируется данными, приведенными в табл. 1.1. Здесь затраты и потери мощности приведены в относительных единицах (о.е.), т.е. в долях от соответствующих величин на 1150 кВ. Для передачи мощности 5 ГВт потребовалось бы 11 цепей на 330 кВ (суммарные затраты 2,8 о.е.), 2 цепи напряжением 750 кВ (1,7 о.е.), одна цепь на 1150 кВ.

На рис. 1.1 представлена структурная схема двухцепной передачи переменного тока. Такая схема называется связанной в отличие от блочной, в которой цепи на передающем конце и в промежуточных точках не запараллиливаются. Использование блочных схем обычно является вынужденным решением для уменьшения токов короткого замыкания (к.з.). Их стараются не применять, так как при к.з. в линии полностью теряется мощность одной цепи. В связанной схеме при наличии переключательных пунктов (ПП) авария локализуется на отдельном участке, а пропускная способность ДЭП в послеаварий-

ном режиме существенно выше, чем в блочной передаче. В СНГ работают ДЭП 500 и 750 кВ. В настоящее время осваивается класс напряжения 1150 кВ. Такие электропередачи 500 кВ, как Куйбышев—Москва, Куйбышев—Урал, Волгоград—Москва, объединили в 50-е годы в единую сеть энерго-



Р и с. 1.1. Структурная схема дальней передачи переменного тока

системы Центра, Урала, Среднего и Нижнего Поволжья. В 1978 г. ввод в эксплуатацию ВЛ 500 кВ Рубцовск—Барнаул завершил важный этап формирования Единой энергосистемы СНГ — присоединение ОЭС Сибири. Такие ДЭП напряжением 1150 кВ, как Экибастуз—Кустанай—Челябинск, Экибастуз—Барнаул—Итат—Канск, рассчитаны на пропускную способность 3—5 ГВт на цепь.

Т а б л и ц а 1 2

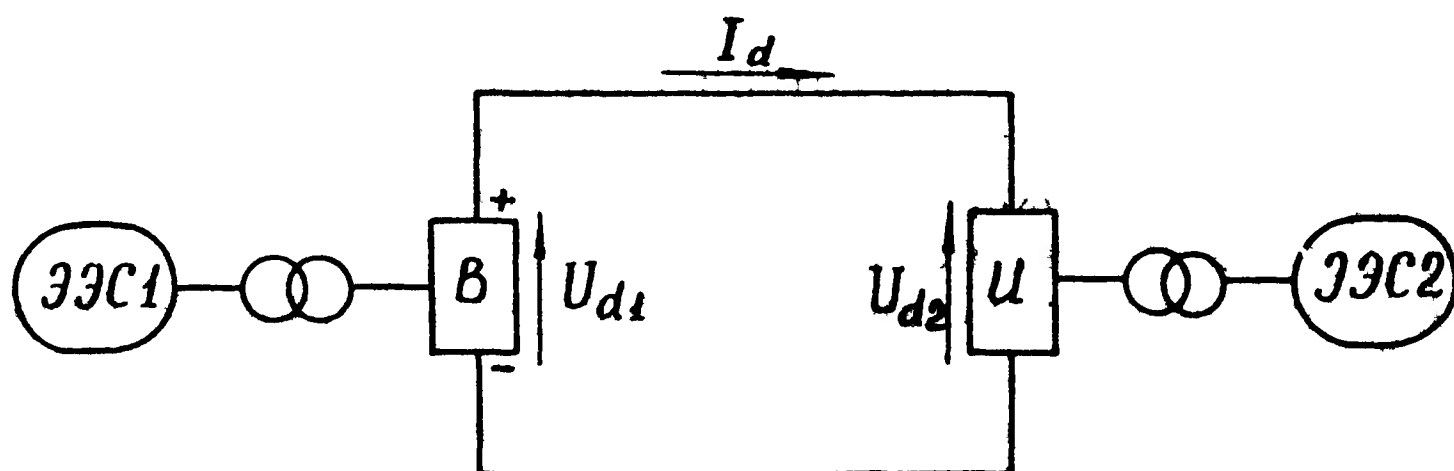
Передачи постоянного тока

Название передачи	Страна	Напряже- ние, кВ	Длина, км	Мощ- ность, МВт	Год ввода в эксплуа- тацию
Кашира—Москва	СССР	±100	120	30	1950
Волгоград—Донбасс	То же	±400	475	720	1965
Тихоокеанская	США	±400	1362	1440	1970
Инга—Шаба	Заир	±500	1700	560	1976
Ла-Манш	Англия— Франция	±270	68	2000	1985
Нельсон Ривер	Канада	±500	895	2000	1987
Итайпу	Бразилия	±600	800	6300	1985
Кабора—Басса	Мозамбик	±533	1414	1920	1988
Экибастуз—Центр	СССР	±750	2450	6000	—

Аналогичная картина с ростом напряжений и пропускной способности наблюдается и в ДЭП постоянного тока.

В табл. 1.2 приведены данные о некоторых наиболее мощных передачах постоянного тока (ППТ) в СНГ и за рубежом.

Структурная схема ППТ показана на рис. 1.2. Две энергосистемы связаны между собой передачей, в которой преобразование электрической энергии из переменного тока в постоянный и обратно осуществляется с помощью выпрямительного (В) и инверторного (И) устройств. Мощность передается из ЭЭС1 в ЭЭС2. Заметим, что преобразовательные устройства



Р и с. 1.2. Структурная схема передачи постоянного тока

могут реверсировать передачу (из ЭЭС2 в ЭЭС1), тогда В и И меняются своими ролями.

1.2. Технико-экономическое сопоставление передач переменного и постоянного тока

Повышение мощностей электропередач, мощностей ЭЭС переменного тока, территориальное расширение зоны централизации электроснабжения ставят перед энергетиками сложные проблемы. К ним относятся:

- трудности управления потоками электрической энергии в межсистемных связях (МСС), так как коэффициенты управляемости перетоками между ОЭЭС обратно пропорциональны их вращающим моментам;

- распространение аварийных возмущений на все синхронно работающие генераторы, что приводит к усложнению организации противоаварийной автоматики и повышению вероятности каскадного развития аварий;

- распространение отклонений частоты на большие территории даже при локальных причинах их проявлений;

- повышение мощности токов короткого замыкания (ТКЗ), приводящее к необходимости замены выключателей на более мощные и дорогие;

- увеличение внутренних перенапряжений в высоковольтном оборудовании;

— возрастание отрицательных эффектов коронирования — потерь мощности и энергии, радио- и телепомех, шума проводов;

— увеличение габаритов опор и ширины полосы отчуждения ВЛ.

Применение постоянного тока позволяет снять или уменьшить перечисленные выше трудности. ППТ имеют следующие основные преимущества перед передачами переменного тока.

1. Реактивные параметры электропередачи не оказывают существенного влияния на потери напряжения и мощности, поэтому они меньше при прочих равных условиях.

2. Уменьшение тока, передаваемого по линии за счет отсутствия реактивной мощности.

3. Обеспечение возможности несинхронной работы связываемых ЭЭС.

4. Отсутствие ограничения передаваемой мощности по условиям устойчивости.

5. Сокращение числа проводов в линии от трех до двух при возможности работы одним проводом через «землю».

6. Уменьшение изоляционных промежутков при одинаковых номинальных напряжениях. Более равномерное распределение напряженности электрического поля вдоль гирлянды. Уменьшение за счет этого длины и веса гирлянды изоляторов.

7. Возможность применения более простых конструкций опор ВЛ (одностоечных вместо двухстоечных). Например, в ППТ Волгоград—Донбасс (800 кВ) это дает снижение веса опоры до 4,3 т по сравнению с 7,3 т в передаче 500 кВ Куйбышев—Москва.

8. Уменьшение числа расщеплений проводов. Снижение гололедной нагрузки. Как следствие — возможность уменьшения сечения стального сердечника проводов.

9. Выполнение вентильными преобразователями функций быстродействующего выключателя и регулятора напряжения.

10. Отсутствие влияния передачи на мощность к. з. в приемной системе.

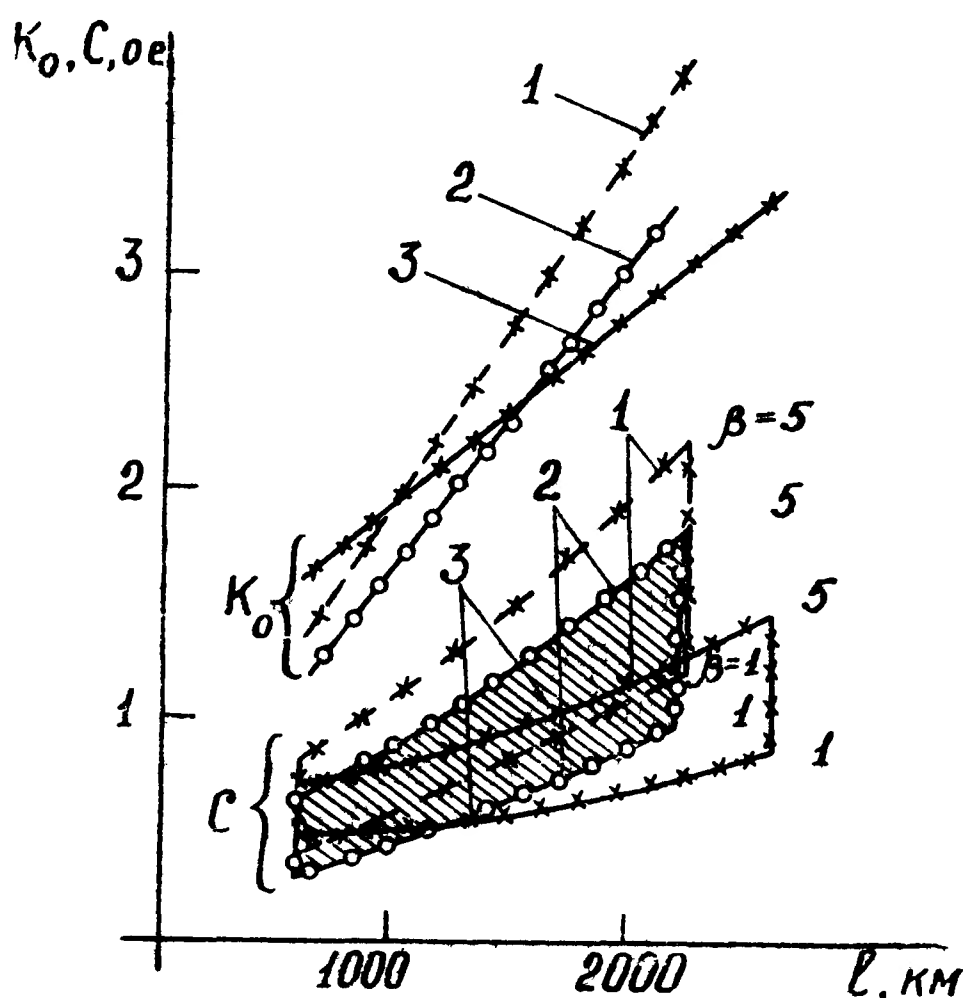
11. Возможность применения повышенных напряжений в кабельных линиях. Особенно эффективно применение ППТ становится при пересечении водных пространств кабельными линиями.

12. Эффективность сооружения электропередач на расстояния, близкие к 1500 км (четверть длины волны переменного тока 50 Гц), когда в передаче переменного тока приходится ставить большие мощности реакторов и батарей статических кон-

денсаторов для изменения ее параметров с целью повышения пропускной способности и регулирования напряжения.

13. Эффективность передачи мощности от ГЭС, у которых повышается КПД за счет выбора оптимальной скорости вращения ротора гидрогенератора.

14. Отсутствие эффекта перенапряжений на конце линии, находящейся на холостом ходу.



Р и с. 1.3. Сопоставление показателей электропередач разного типа при различной стоимости потерь энергии β ($P=2$ млн. кВт, $T=7000$ ч):

1 — себестоимость C и удельные капиталовложения K_0 в передачу переменного тока напряжением 600 кВ без промежуточных отборов; 2 — то же, но с промежуточными отборами, 3 — передача постоянного тока без промежуточных отборов напряжения ± 600 кВ

Конечно, технико-экономические преимущества ППТ в значительной мере гасятся, во-первых, ущербом из-за ухудшения качества электроэнергии, связанного с появлением высших гармоник при преобразовании электроэнергии из постоянного в переменный ток, во-вторых, большими затратами на преобразовательное оборудование и на дополнительные устройства (фильтры), компенсирующие ухудшение качества электроэнергии в приемной системе.

Высокая стоимость выпрямителей и инверторов приводит к тому, что ППТ становятся экономически оправданными лишь при больших длинах передачи, исключая вынужденные решения, связанные с применением кабельных подводных передач, глубокого ввода и вставок постоянного тока (ВПТ). Это же обстоятельство практически исключает возможность промежуточных отборов мощности. Критическая длина волны $l_{кр}$, после которой становится выгодным применение ППТ по сравнению с передачей переменного тока, зависит от стоимости преобразовательного оборудования. Совершенствование и развитие тиристорной техники постоянно снижают величину $l_{кр}$. По данным проектных разработок, до 1990 г. в американских странах значение $l_{кр}$ считалось равным 600 км. В странах, имеющих большие протяженные электрические сети, в настоящее время усиливается роль ППТ как системообразующих связей, работающих параллельно с передачами переменного тока.

Из рис. 1.3 [2], представляющего результаты расчетов по советским данным, видно, что экономические характеристики ППТ становятся лучшими при длинах более 1000 км. При этом сопоставлении системный эффект не учитывался. Его учет приводит к появлению областей эффективности ППТ меньших длин. Для кабельных линий их экономическая эффективность проявляется уже при длинах более 80 км.

1.3. Экологические факторы и безопасность передачи электроэнергии по линиям высокого напряжения

Необходимость увеличения мощности ДЭП приводит к возрастанию рабочих напряжений. Появились передачи сверхвысокого напряжения (СВН) от 500 до 1000 кВ и ультравысокого напряжения (УВН) свыше 1000 кВ. Вслед за передачами 1150 кВ не исключается возможность появления нового класса напряжения в диапазоне 1500—2000 кВ. Воздействие повышенного напряжения на окружающую среду требует учета экологических факторов при проектировании и эксплуатации ДЭП.

1. Ущерб лесному хозяйству из-за необходимости создания просек. В табл. 1.3 приведена ширина просеки в лесных пространствах.

2. Сооружение ВЛ, которое приводит к отчуждению из хозяйственного применения пахотные земли и луга, используемые для установки опор. Опоры ЛЭП СВН и УВН на оттяжках требуют достаточно большой площади (см. табл. 1.3).

3. Нарастание напряжения усиливает коронный заряд. Потери на корону становятся соизмеримыми по сравнению с потерями активной мощности в проводах. Если потери на корону легко учитываются в экономическом обосновании ДЭП, то воздействие коронного заряда на окружающую среду должно учитываться в виде экологического фактора. В частности, на человека неприятное, а иногда и опасное влияние оказывает шум от короны (акустический фактор). При 80 дБ шум вредно воздействует на органы слуха и вызывает другие физиологические последствия. Здесь же следует отметить, что ВЛ СВН и УВН являются мощным источником радиопомех, поэтому нормируется расстояние прохождения трассы ЛЭП не менее 300 м до крайних жилых домов населенных пунктов.

Т а б л и ц а 1.3

Сопоставление ДЭП переменного тока

Параметр	Напряжение, кВ			
	330	500	750	1150
Расстояние между крайними фазами, м	22	28	40	47
Ширина просеки, м	54	64	80	87
Площадь отчуждаемой земли на 1 км линии, м ²	$7,8 \cdot 10^4$	$8,8 \cdot 10^4$	$15,5 \cdot 10^4$	$31 \cdot 10^4$
Отношение максимальных потерь на корону к потерям на нагрев при экономической плотности тока, %	8,7	15	18	35

4. Сильные электрические поля неблагоприятно влияют на человека и животных. При длительном пребывании человека в поле с напряженностью более 15 кВ/м могут происходить физиологические изменения в нервной и сердечно-сосудистой системах, в мышечных тканях и других органах. Наблюдается изменение кровяного давления и пульса, может появиться аритмия и повышенная нервная возбудимость. Существуют нормы на продолжительность пребывания человека в течение суток при напряженности поля 5 кВ/м — без ограничения, 10 кВ/м — 180 мин, 20 кВ/м — 10 мин, 25 кВ/м — 5 мин.

Наиболее чувствительны к электрическому полю даже при кратковременном попадании в зону его действия копытные животные и человек в обуви, изолирующей его от земли. Накапли-

вающийся на теле заряд при прикосновении к заземленным предметам и растениям с треском стекает, вызывая неприятные, а порой болезненные ощущения. Копытные животные избегают пересечения трасс ВЛ. Замечено, что ЛЭП, проходящие в широтном направлении, нарушают сезонные миграции животных с севера на юг и обратно.

Для человека могут представлять опасность и изолированные металлические предметы, например машина или трактор на колесах с резиновыми шинами. Электрический заряд благодаря большой емкости таких предметов может при прикосновении человека вызвать самые неблагоприятные последствия. Все механизмы, попадающие в зону электрических полей ВЛ СВН и УВН, должны поэтому надежно заземляться.

Ограничение напряженности поля под ЛЭП может быть достигнуто за счет правильного использования растительности под линией. Средняя напряженность электрического поля на просеке с древесно-кустарниковой растительностью высотой 4—5 м под ВЛ не превышает 1 кВ/м при наиболее неблагоприятных условиях отрицательных температур. Это приводит к полной экологической безопасности людей и животных под линиями. Следовательно, увеличивая высоту подвески проводов и сохраняя кустарниковую растительность, можно снять экологические проблемы в зонах с лесной растительностью. На открытых пространствах необходимо либо также увеличивать высоту опор до обеспечения полной безопасности людей и животных, либо обеспечивать экранирование при помощи тросов, подвешиваемых под фазами передачи.

Во многих странах устанавливается допустимая напряженность электрического поля под ЛЭП УВН такая же, как для ЛЭП более низких классов напряжения (не более 5 кВ/м). Уровень шумов от короны при дожде и от вибрации проводов, как правило, не должен превышать уровень шума ЛЭП 500 кВ, принятый равным 60 дБ.

Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И УРАВНЕНИЯ ДЛИННОЙ ЛИНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Первичные и вторичные параметры четырехполюсника

Длинную линию можно рассматривать как четырехполюсник (ЧП) с параметрами A , B , C , D , называемыми первичными. Примем напряжение и ток $\dot{U}_1$, $\dot{I}_1$ как входные параметры, $\dot{U}_2$,

$\dot{I}_2$ — напряжение и ток выхода ЧП. Здесь и далее, чтобы избавиться от коэффициента $\sqrt{3}$, учитывающего трехфазный характер передачи, используется линейный ток $I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}$, при этом индекс л ниже везде опущен. Связь между параметрами начала и конца (входа и выхода) ЧП описывается уравнениями:

$$\dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2; \quad (2.1a)$$

$$\dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2. \quad (2.1б)$$

Поскольку ЧП, эквивалентный линии передачи, можно считать симметричным, то $A=D$, а третье уравнение ЧП, связывающее первичные параметры, записывается в следующем виде:

$$A^2 - BC = 1. \quad (2.2)$$

Если первичные параметры можно найти для ЧП с сосредоточенными параметрами из опытов к.з. и х.х, то для линии с распределенными параметрами это сделать сложнее, и именно этому посвящен нижеследующий материал.

Введем понятие вторичных параметров ЧП, которые находятся из особого режима подключения характеристической нагрузки. Этой нагрузке соответствует комплексное сопротивление Z_c , называемое характеристическим. Величина Z_c такова, что выполняется соотношение, когда входное $Z_{\text{вх}}$ и выходное $Z_{\text{вых}}$ сопротивления ЧП равны друг другу, т. е.

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} = Z_c. \quad (2.3)$$

Используя уравнения (2.1, а, б),

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{AU_2 + BI_2}{CU_2 + AI_2} = \frac{A(U_2/I_2) + B}{C(U_2/I_2) + A} = \frac{AZ_c + B}{CZ_c + A} = Z_c,$$

откуда следует, что

$$CZ_c^2 + AZ_c = AZ_c + B,$$

тогда выражение для вторичного параметра Z_c через первичные

$$Z_c = \sqrt{B/C}. \quad (2.4)$$

Режим подключения характеристического сопротивления называется характеристическим. В этом режиме отношение M напряжения начала $\dot{U}_1$ к напряжению конца $\dot{U}_2$ позволяет най-

ти еще один вторичный параметр γ , называемый постоянной передачи ЧП. Обозначая через ψ_1 и ψ_2 фазовые углы напряжений $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, получаем

$$M = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{U_1 e^{j\psi_1}}{U_2 e^{j\psi_2}} = \frac{U_1}{U_2} e^{j(\psi_1 - \psi_2)} = \frac{U_1}{U_2} e^{j\beta}, \quad (2.5)$$

где β — сдвиг по фазе напряжений начала и конца. Из постоянной передачи γ видно отношение напряжений в логарифмическом масштабе, т. е.

$$\gamma = \ln M = \ln \frac{U_1}{U_2} + j\beta = \alpha + j\beta. \quad (2.6)$$

Из (2.6) видно, что γ есть комплексное число, вещественная составляющая которого α соответствует логарифму отношения модулей напряжения начала и конца ЧП (коэффициент затухания), а мнимая составляющая, как было дано выше, отражает поворот вектора напряжения на ЧП.

На основании введенных вторичных параметров Z_c и γ можно перейти к новому виду уравнений (2.1), предварительно найдя связь между ними и первичными параметрами. Из (2.6) с учетом (2.3) и (2.4)

$$M = e^\gamma = \frac{U_1}{U_2} = \frac{A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2}{\dot{U}_2} = A + \sqrt{BC}. \quad (2.7)$$

Запишем последнее выражение совместно с (2.2) и получим систему из двух уравнений относительно переменных A и $\sqrt{BC}$:

$$A + \sqrt{BC} = e^\gamma;$$

$$A^2 - (\sqrt{BC})^2 = 1,$$

откуда

$$\sqrt{BC} = e^\gamma - A; \quad A^2 - (e^\gamma - A)^2 = 1.$$

Дальнейшие преобразования приводят к формулам:

$$A = \frac{e^\gamma + e^{-\gamma}}{2} = \operatorname{ch} \gamma; \quad \sqrt{BC} = \frac{e^\gamma - e^{-\gamma}}{2} = \operatorname{sh} \gamma. \quad (2.8)$$

Записывая (2.4) последовательно в виде

$$\sqrt{BC/C^2} = Z_c; \quad \sqrt{B^2/BC} = Z_c,$$

получаем первичные параметры:

$$C = \frac{1}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma; \quad B = Z_c \operatorname{sh} \gamma. \quad (2.9)$$

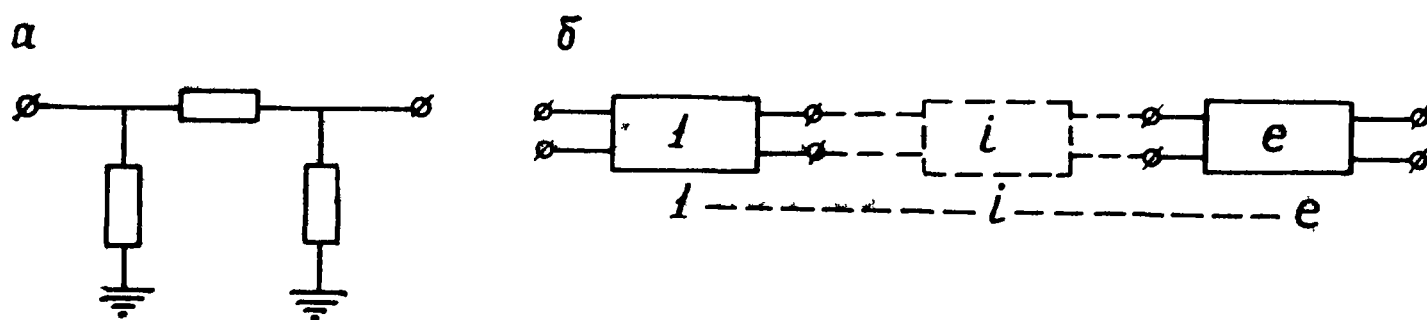
Таким образом, уравнения ЧП (2.1) можно записать через вторичные параметры:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma + \dot{I}_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma; \quad (2.10a)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_2 \frac{1}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma. \quad (2.10б)$$

2.2. Длинная линия как цепь элементарных четырехполюсников

Задача заключается в том, чтобы на основании известных удельных параметров на 1 км длины линии (r_0, x_0, g_0, b_0 — ак-



Р и с. 2.1. Схема замещения электропередачи.
 а — участка длиной 1 км, б — длинной линии

тивного и реактивного сопротивлений, активной и емкостной проводимости) найти вторичные параметры ДЭП γ и Z_c . Не будет грубым допущением, если 1 км линии представить элементарным симметричным ЧП с П-образной схемой замещения (рис. 2.1, а), а всю ДЭП как цепь из таких ЧП (рис. 2.1, б), где l — длина передачи в км.

Для П-образного ЧП из опытов к. з и х. х получаем, что

$$A_0 = 1 + \frac{Z_0 Y_0}{2} \approx 1, \quad B_0 = Z_0, \quad C_0 = Y_0, \quad (2.11)$$

где индекс 0 показывает, что речь идет о параметрах элементарного четырехполюсника, $Z_0 = r_0 + jx_0$, $Y_0 = g_0 + jb_0$. Правомерность записи $A=1$ объясняется тем, что для ВЛ (Ом/км): $r_0 < x_0$, $g_0 \approx 0$, $x_0 \approx 0,3$, $b_0 = 3 \cdot 10^{-6}$ см/км. Из (2.11) и (2.7) получаем значения вторичных параметров элементарного ЧП:

$$Z_{c_0} = \sqrt{Z_0 / Y_0}; \quad (2.12)$$

$$\gamma_0 = \ln (A_0 + \sqrt{B_0 C_0}) = \ln (1 + \sqrt{Z_0 Y_0}). \quad (2.12)$$

Учитывая, что $\sqrt{Z_0 Y_0} \ll 1$, последнее выражение можно записать в виде

$$\gamma_0 = \ln (1 + \sqrt{Z_0 Y_0}) = \sqrt{Z_0 Y_0}. \quad (2.13)$$

Рассмотрим последний ЧП с номером l в цепи (см. рис. 2.1, б). Присоединим к нему характеристическую нагрузку Z_{c0} . Тогда его входное сопротивление ($U_{вх,l}/I_{вх,l}$) окажется равным выходному Z_{c0} . Следовательно, для следующего с конца $(l-1)$ ЧП рассматриваемый режим является также характеристическим, поскольку на его выходе подключено характеристическое сопротивление Z_{c0} . Аналогичные рассуждения можно привести для $(l-2)$ ЧП и всех остальных до первого. Таким образом, приходим к заключению, что входное сопротивление всей цепи (передачи) равно выходному Z_{c0} , т. е. $Z_c = Z_{c0}$.

Из сказанного можно сделать следующие выводы. Во-первых, характеристическое сопротивление передачи Z_c не зависит от длины линии, оно равно корню квадратному из отношения удельного сопротивления Z_0 к удельной проводимости, а также может быть записано через полные сопротивление и проводимость всей передачи:

$$Z_c = \sqrt{Z_0/Y_0} = \sqrt{Z_0 l/Y_0 l} = \sqrt{Z/Y}. \quad (2.14)$$

Для ЛЭП сопротивление Z_c часто называют волновым.

Во-вторых, получается, что в характеристическом режиме отношение напряжения к току $\dot{U}_i/\dot{I}_i = \text{const}$ в любой точке линии.

Мощность, протекающая в линии при присоединении характеристического сопротивления, называется натуральной:

$$\dot{S}_{\text{нат}} = \frac{U_2^2}{Z_c}, \quad (2.15)$$

а соответствующий ей ток

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_c} = \dot{I}_н \quad (2.16)$$

также будем называть натуральным.

Для цепочечной схемы

$$\gamma = \ln M = \ln \left(\frac{\dot{U}_{вх\ 1}}{\dot{U}_{вх\ 2}} \frac{\dot{U}_{вх\ 2}}{\dot{U}_{вх\ 3}}, \dots, \frac{\dot{U}_{вх\ l}}{\dot{U}_{вых\ l}} \right)$$

или

$$\gamma = l \ln M_0 = l \gamma_0 = l \sqrt{Z_0 Y_0} = \sqrt{Z Y}. \quad (2.17)$$

Уравнения ДЭП через вторичные параметры элементарных ЧП приобретают вид:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch}(l \gamma_0) + \dot{I}_2 Z_c \operatorname{sh}(l \gamma_0); \quad (2.18a)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_2 \frac{1}{Z_c} \operatorname{sh}(l \gamma_0) + \dot{I}_2 \operatorname{ch}(l \gamma_0). \quad (2.18b)$$

Для расчета режима ДЭП по уравнениям (2.18, а, б), в которых фигурируют гиперболические функции комплексных переменных, следует воспользоваться известными формулами:

$$\operatorname{ch} \gamma = \operatorname{ch}(\alpha + j\beta) = \operatorname{ch} \alpha \cos \beta + j \operatorname{sh} \alpha \operatorname{sh} \beta; \quad (2.19a)$$

$$\operatorname{sh} \gamma = \operatorname{sh}(\alpha + j\beta) = \operatorname{sh} \alpha \cos \beta + j \operatorname{ch} \alpha \sin \beta. \quad (2.19b)$$

2.3. Параметры реальных дальних электропередач

Под реальной ДЭП будем понимать передачу, в которой не делается допущения об отсутствии потерь активной мощности, хотя активное сопротивление r_0 существенно меньше индуктивного x_0 . Так как в соответствии с (2.12)

$$\gamma_0 = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)}, \quad (2.20)$$

то $\alpha = \operatorname{Re}[\gamma_0]$, $\beta_0 = \operatorname{Im}[\gamma_0]$.

Для дальнейших рассуждений приведем параметры одной из ДЭП, например 500 кВ с проводами АС-400×3:

$r_0 = 0,025$ Ом/км; $x_0 = 0,3$ Ом/км; $g_0 = 2,25 \cdot 10^{-8}$ См/км; $b_0 = 3,62 \times 10^{-6}$ См/км.

Поскольку проводимость g_0 , характеризующая потери на корону, обычно на два порядка меньше емкостной проводимости b_0 , возводя в квадрат левую и правую части выражения (2.20), можно записать:

$$\gamma_0^2 = (\alpha_0 + j\beta_0)^2 = (r_0 + jx_0)b_0.$$

Переходя к вещественным и мнимым составляющим, получим два уравнения:

$$\alpha_0^2 - \beta_0^2 = -x_0 b_0;$$

$$2\alpha_0 \beta_0 = r_0 b_0,$$

из решения которых относительно α_0 и β_0 следует, что

$$\beta_0 = \sqrt{\frac{r_0 b_0}{2} + \frac{|Z_0|^2 b_0}{2}} \approx \sqrt{x_0 b_0}, \alpha = \frac{r_0 b_0}{2\beta_0}. \quad (2.21)$$

Для рассматриваемой ЛЭП 500 кВ находим:

$$\beta_0 = 1,052 \cdot 10^{-3} \text{ рад/км} = 0,06 \text{ эл. град/км}; \alpha_0 = 0,043 \cdot 10^{-3}.$$

Из полученной величины β_0 видно, что на 1 км ЛЭП при передаче натуральной мощности (при подключении сопротивления, равного характеристическому) происходит сдвиг по фазе на $0,06^\circ$, соответственно на 1000 км имеем 60° , на 3000 км — 180° . Полная волна (сдвиг по фазе на 360°) укладывается в длине ЛЭП 6000 км. Величина α_0 означает, что на каждом километре ЛЭП при этом для напряжений начала и конца участка выполняется соотношение $\ln(U_1/U_2) = 0,043 \cdot 10^{-3}$.

Т а б л и ц а 2.1

Параметры дальних электропередач

U кВ	Провод	Сопротивле- ние, Ом/км		Проводимость, См/км		α_0 , 10^{-3}	β_0 , 10^{-3} рад/км	ΔU , % на 1000 км
		r_0	α_0	g_0 , 10^{-8}	b_0 , 10^{-6}			
220	АС-300	0,098	0,429	4,65	2,64	0,145	1,065	14,5
330	2АС-400	0,037	0,323	2,01	3,46	0,062	1,056	6,2
500	3АС-400	0,025	0,306	2,25	3,62	0,043	1,052	4,3
750	5АС-400	0,015	0,286	1,93	4,13	0,029	1,085	2,9
1150	8АС-330	0,011	0,270	2,07	4,38	0,022	1,090	2,2

U, кВ	Провод	Z, Ом	Мощность, ГВт		Q _{зар} , МВар/км	Потери, кВт		
			P _{нат}	P _{эк}		ΔP	δP	ΔP_Σ
220	АС-300	338	0,14	0,12	0,14	26,5	2,1	28,6
330	2АС-400	305	0,34	0,46	0,41	72,5	2,2	74,7
500	3АС-400	291	0,86	1,04	0,91	108,0	5,6	113,6
750	5АС-400	263	2,14	2,60	2,32	180,0	10,8	190,8
1150	8АС-330	248	5,30	5,25	5,79	218,0	27,4	245,4

Для удобства рассмотрим участок линии $l=1000$ км, соответственно $\ln(U_1/U_2) = 0,043$. С очень малой погрешностью можно записать, что

$$U_1/U_2 = e^{0,043} \approx 1 + 0,43.$$

Если считать, что напряжение одного конца закреплено, то в относительных единицах падение напряжения на участке 1000 км

составит $\Delta U = 0,046$, или 4,3%. В табл. 2.1 приведены значения α_0 , $\Delta \dot{U}$, β_0 и другие параметры для различных передач. В частности, $P_{\text{эк}}$ — мощность, соответствующая экономической плотности тока; ΔP , δP — потери на нагрев и корону.

Характеристическое сопротивление $Z_c = \sqrt{(r_0 + jx_0)/(g_0 + jb_0)}$ для реальных линий оказывается близким к активному с очень малой поперечной составляющей, которой часто пренебрегают. Например, для ЛЭП 500 кВ точное значение $Z_c = (291 - j11,9) \text{ Ом}$, по упрощенной формуле $Z_c = \sqrt{x_0/b_0}$ получается значение $Z_c = 291 \text{ Ом}$. Из сказанного следует, что и натуральная мощность передачи близка к активной, поэтому полное значение $\dot{S}_{\text{нат}}$ обычно заменяется величиной $P_{\text{нат}}$. Так как для рассматриваемого примера $\dot{S}_{\text{нат}} = 500^2 / (291 - j11,9) = 857 + j35$, то в качестве натуральной мощности принимают $P_{\text{нат}} = 857 \text{ МВт}$. В табл. 2.1 приведены значения натуральной мощности для передач 220—1150 кВ.

На примере режима передачи натуральной мощности проиллюстрируем, во-первых, расчет по уравнениям (2.18), во-вторых, покажем, какая погрешность получается при отказе от использования волновых уравнений и расчете режима ДЭП по П-образной схеме замещения.

Пусть дана передача длиной $l = 1000 \text{ км}$, $Z_c = 291 \text{ Ом}$. Известно напряжение конца $U_2 = 500 \text{ кВ}$, передаваемая мощность в конце равна натуральной $P_2 = P_{\text{нат}} = 857 \text{ МВт}$, т. е. $I_2 = I_{\text{н}} = 1,714 \text{ кА}$. Постоянная передачи $\gamma = \alpha + j\beta = 1000$ $\gamma_0 = 0,043 + j1,052$, откуда $\beta = 60^\circ$. Из формулы (2.19) получаем:

$$\text{ch } \gamma = \text{ch } 0,043 \cos 60^\circ + j \text{sh } 0,043 \sin 60^\circ = 0,5004 + j 0,037;$$

$$\text{sh } \gamma s = \text{sh } 0,043 \cos 60^\circ + j \text{ch } 0,043 \sin 60^\circ = 0,021 + j 0,867.$$

Здесь $\text{ch } 0,043 = 1,0008$; $\text{sh } 0,043 = 0,043$. Поскольку для ДЭП выше 500 кВ $\alpha \ll \beta$, вполне приемлемо допущение, что $\text{sh } \alpha = 0$, $\text{ch } \alpha = 1$, поэтому формулы (2.19) преобразуются:

$$\text{ch } (\alpha + j\beta) = \cos \beta; \text{sh } (\alpha + j\beta) = j \sin \beta. \quad (2.22)$$

Из (2.10) или, что то же самое, (2.18) можно найти напряжение и ток начала передачи:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= 500 (0,5004 + j 0,037) + 291 (0,021 + \\ &+ j 0,867) 1,719 = 520 < 59^\circ 55'; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= (500/29\dot{i}) (0,021 + j0,867) + \\ &+ 1,714 (0,5004 + j0,037) = 1,8 < 60^\circ 05'. \end{aligned}$$

Мощность начала передачи $\dot{S}_1 = 934 - j2,6$. Потери активной мощности $\Delta P = 77$ МВт. Таким образом, передача натуральной мощности не вызывает никаких технических затруднений.

Определим режим ДЭП по П-образной схеме замещения. Ток $\dot{I}_2 = 1,714 < 0^\circ$; напряжение $\dot{U}_2 = 500 < 0^\circ$. Зарядный ток $\dot{I}_{2\text{зар}} = \dot{U}_2 (jb_0 l/2) = j500 \cdot 3,62/2 \cdot 10^{-3} = j0,905$ кА. Ток в сопротивлении ЛЭП $Z_l = 1000 (r_0 + jx_0) = 25 + j306$ составляет $\dot{I}_l = \dot{I}_2 - \dot{I}_{2\text{зар}} = 1,714 - j0,905$. Падение напряжения в сопротивлении Z_c определяется следующим образом: $\Delta \dot{U} = \dot{I}_c Z_c = 310,8 + j501,3$. Следовательно, напряжение начала $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta \dot{U} = 810,8 + j501,3 = 960 < 31^\circ 30'$. Зарядный ток начала $\dot{I}_{1\text{зар}} = \dot{U}_1 (jb_0 l/2) = -0,905 + j1,48$. Ток начала передачи $\dot{I}_1 = \dot{I}_l - \dot{I}_{1\text{зар}} = 2,619 - j2,385 = 3,55 < 42^\circ 30'$.

Как видно из полученных результатов, представление ДЭП четырехполюсником с сосредоточенными параметрами приводит к недопустимой погрешности. Более того, по такому расчету можно сделать качественно неверные выводы, например о невозможности передачи активной мощности 857 МВт в рассматриваемом примере, так как напряжение $|\dot{U}_1|$ не укладывается в технические допуски.

2.4. Линия без потерь активной мощности (идеальная линия)

Если в линии передачи пренебречь активными сопротивлениями и активной проводимостью, т. е. принять идеализацию $r_0 = 0$, $g_0 = 0$, то коэффициент затухания $\alpha_0 = 0$ и постоянная передачи

$$\gamma = l\gamma_0 = l \sqrt{jx_0 jb_0} = jl \sqrt{x_0 b_0} = j\lambda.$$

Параметр $\lambda = l \sqrt{x_0 b_0}$ называют волновой длиной идеальной линии, он показывает, на какую величину (в радианах) произойдет сдвиг напряжения и тока начала передачи по отношению к $\dot{U}_2$ и $\dot{I}_2$ при передаче натуральной мощности $P_{\text{нат}}$. Например, ЛЭП

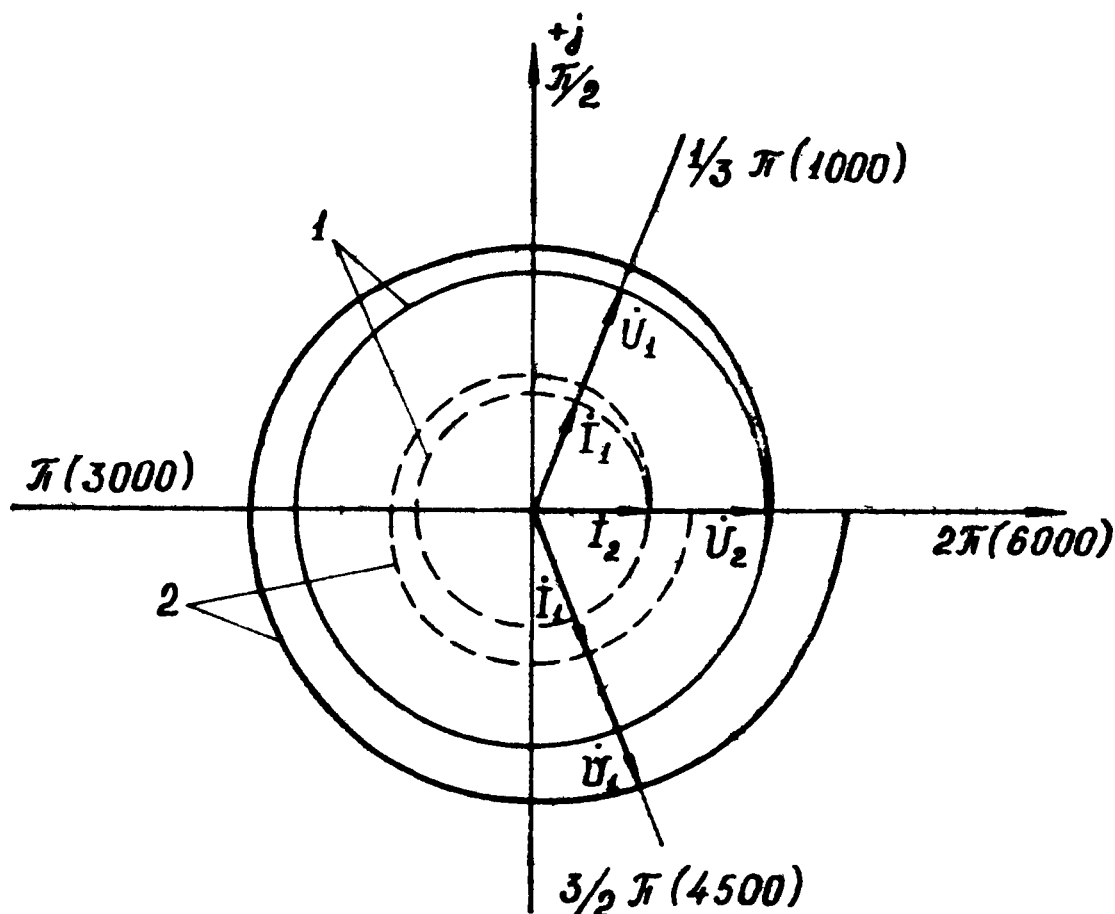
длиной $l=1000$ км имеет волновую длину $\lambda=\pi/3$. Для анализа режимов ДЭП ниже будем рассматривать характерные передачи в четверть волны $\lambda=\pi/2$ при $l=1500$ км и половину волны $\lambda=\pi$ при $l=3000$ км.

Для идеальной линии характеристическое сопротивление и натуральная мощность величины чисто активные, так как $Z_c = \sqrt{x_0/b_0}$, $P_{\text{нат}} = U_2^2/Z_c$. С учетом (2.22) уравнения ДЭП имеют вид:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \lambda + j \dot{I}_2 Z_c \sin \lambda; \quad (2.23a)$$

$$\dot{I}_1 = j \dot{U}_2 \frac{1}{Z_c} \sin \lambda + \dot{I}_2 \cos \lambda. \quad (2.23b)$$

Рассмотрим режим передачи натуральной мощности ($P_2 = P_{\text{нат}}$, $\dot{I}_2 = \dot{I}_n = \dot{U}_2/Z_c$). Поскольку $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_c$, то уравнения



Р и с. 2.2. Векторная диаграмма токов и напряжений линии при передаче натуральной мощности:
1 — для идеальной линии, 2 — с учетом активных потерь

(2.23, а, б) преобразуются к виду:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 (\cos \lambda + j \sin \lambda) = \dot{U}_2 e^{j\lambda}; \quad (2.24a)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 (\cos \lambda + j \sin \lambda) = \dot{I}_2 e^{j\lambda}. \quad (2.24b)$$

Таким образом, получены уравнения окружности в комплексной плоскости (рис. 2.2). При одинаковой волновой длине

сдвиг тока и напряжения по отношению к концу передачи одинаков и составляет λ . Так как в конце передачи подключена чисто активная нагрузка ($\varphi_2=0$), то и в любой точке линии сдвиг между током и напряжением равен нулю ($\varphi_l=0$), следовательно, в линии протекает активная мощность и отсутствует реактивная составляющая. Модули напряжения и тока остаются неизменными.

В действительности при $r_0 \neq 0$ и $g_0 \neq 0$ уравнения передачи описывают спирали. На рис. 2.2 показана такая спираль напряжения $\dot{U}_1$ для реальных линий. Напряжение вдоль линии постепенно возрастает.

Факт, что $\varphi_l=0$ требует разъяснения. В линии протекает ток, вызывающий потери реактивной мощности ΔQ в сопротивлении X . Однако, несмотря на потери ΔQ , ток и мощность остаются активными, а это означает, что потери полностью компенсируются зарядной мощностью линии. На каждом участке линий сколько генерируется, столько же и теряется реактивной мощности ($Q_{зар}^0 = \Delta Q^0$). Генератор, работающий в начале передачи, должен вырабатывать активную мощность, равную натуральной (в реальной линии $P_1 > P_H$ на величину потерь ΔP (см. пример в предыдущем п. 2.3)).

Рассмотрим режимы передачи активной мощности, отличной от натуральной при $Q_2=0$. Пусть ток конца отличается от натурального на величину $\delta \dot{I}$, т. е. $\dot{I}_2 = \dot{I}_H + \delta \dot{I}$. Тогда напряжение и ток начала линии примут значения:

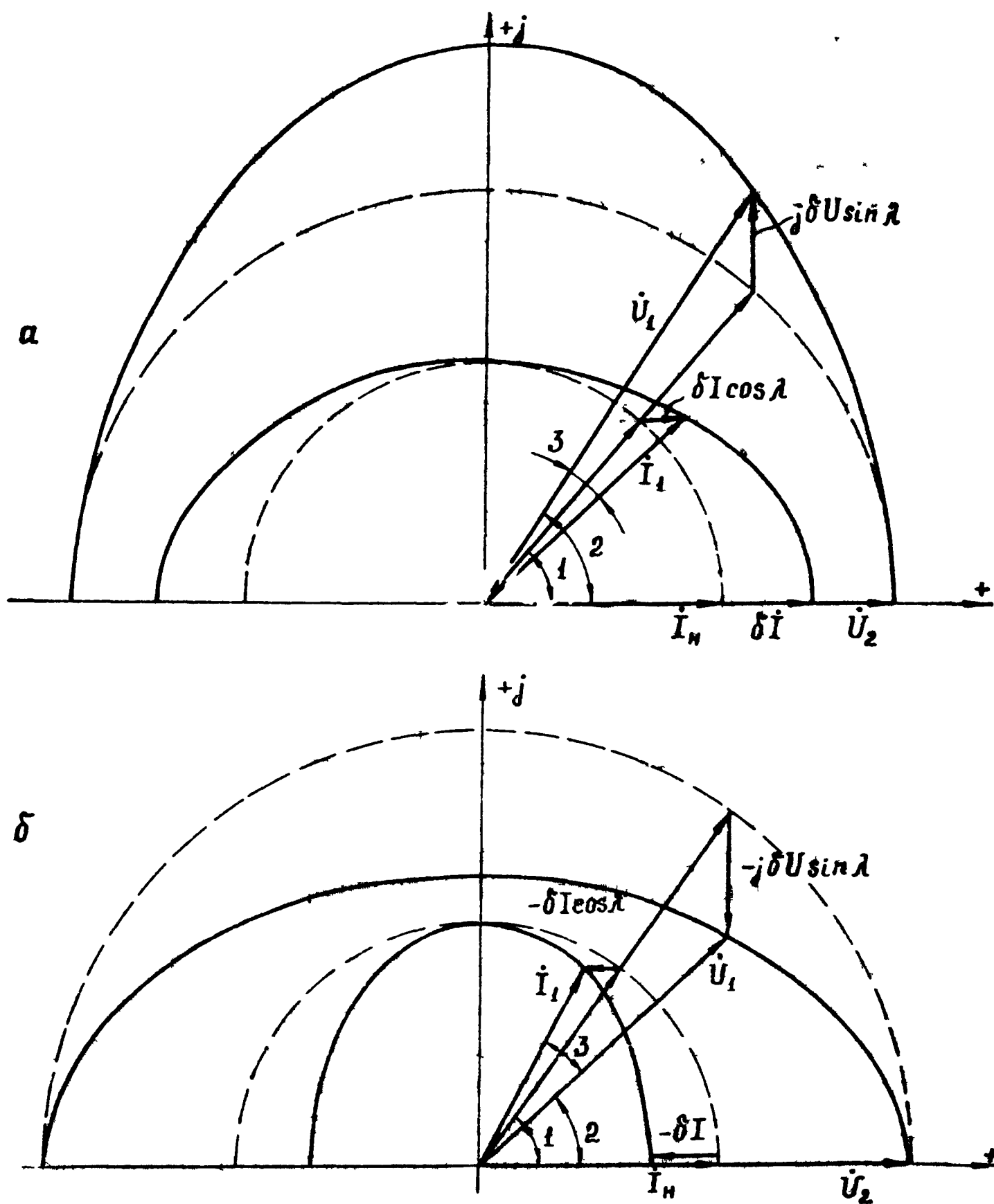
$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \lambda + jZ_c \left(\frac{\dot{U}_2}{Z_c} + \delta \dot{I} \right) \sin \lambda = \dot{U}_2 e^{j\lambda} + j\delta \dot{U}_2 \sin \lambda;$$

$$\dot{I}_1 = j\dot{I}_H \sin \lambda + (\dot{I}_H + \delta \dot{I}) \cos \lambda = \dot{I}_H e^{j\lambda} + \delta \dot{I} \cos \lambda,$$

где $\delta \dot{U} = \delta \dot{I} Z_c$. Здесь и ниже вектор $\dot{U}_2$ ориентирован вдоль вещественной оси, т. е. $\dot{U}_2 = U_2$.

Полученные уравнения описывают эллипсы. При этом эллипс напряжения получается из окружности ($P_2 = P_H$) с мнимой добавкой $j\delta U \sin \lambda$, а эллипс тока с вещественной добавкой $\delta I \cos \lambda$. Отклонение нагрузки от натуральной при $Q_2=0$ приводит к нарушению равенства модулей напряжения начала и конца передачи.

Диаграммы для тока и напряжения показаны на рис. 2.3. Записывая U_1 как



Р и с. 2.3. Векторные диаграммы токов и напряжений при передаче мощности:

a — больше натуральной ($P_2 > P_H$, $\delta I > 0$); *б* — меньше натуральной ($P_2 < P_H$, $\delta I < 0$); *1* — сдвиг по фазе напряжения и тока по отношению к концу передачи в режиме натуральной мощности, угол λ ; *2* — угол δ между векторами $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ в рассматриваемом режиме; *3* — угол φ_2 сдвига по фазе вектора тока начала передачи по отношению к вектору напряжения $\dot{U}_1$

$$\dot{U}_1 = U_1 \cos \delta + jU_1 \sin \delta$$

и представляя присоединенную нагрузку в виде сопротивления $Z_c = U_2/I_2$, уравнение передачи (2.23a) можно привести к виду:

$$U_1 (\cos \delta + j \sin \delta) = U_2 (\cos \lambda + jZ_c/Z_2 \sin \lambda).$$

Умножим левую и правую части на свои сопряженные значения. Это позволяет найти соотношение между модулями напряжения начала и конца передачи при различных сопротивлениях присоединенной нагрузки Z_2 :

$$U_1 = \sqrt{\cos^2 \lambda + (Z_c/Z_2)^2 \sin^2 \lambda}.$$

Если по линии передается натуральная мощность, то $Z_2 = Z_c$ и,

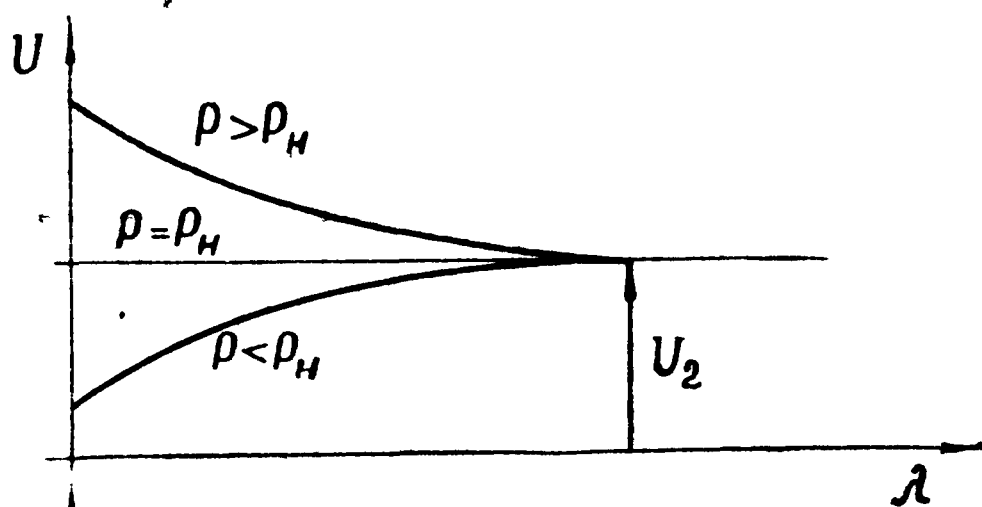


Рис. 2.4. Диаграмма напряжений вдоль линии при отсутствии регулирования

как было показано выше, модуль напряжения вдоль линии не меняется $U_1 = U_2$. На рис. 2.4 показано распределение напряжения вдоль линии в различных режимах при фиксированном значении напряжения U_2 . На основании полученных диаграмм можно сделать некоторые выводы. Во-первых, отклонение активной нагрузки от натуральной при нулевой реактивной нагрузке $Q_2 = 0$ приводит к отклонению напряжения начала передачи на величину $\delta U = j\delta U \sin \lambda$. Модуль напряжения U_1 может существенно отличаться от номинала. При $P_2 > P_n$, $U_1 > U_2$. Например, для ЛЭП 1000 км ($\lambda = 60^\circ$) при передаче $P_2 = 1,5P_n$ имеем $\delta I = 0,5 I_n$, $U_1 = 1,4 U_2$. Чем больше превышение нагрузки по сравнению с натуральной, тем сильнее вытягиваются эллипсы напряжения по вертикали и тока по горизонтали.

При $P_2 < P_n$ происходит снижение напряжения начала передачи. Эллипсы напряжения и тока сжимаются соответственно по вертикали и горизонтали. Наибольшее отклонение напряже-

ния начала наблюдается в передачах длиной $l=1500$ км ($\lambda=\pi/2$).

Во-вторых, несмотря на отсутствие реактивной мощности на приемном конце $Q_2=0$, реактивная мощность начала передачи оказывается не равной нулю. Из диаграммы видно, что появляется угол φ между током и напряжением начала передачи. При передаче $P_2 > P_n$ ток $\dot{I}_1$ отстает по фазе от $\dot{U}_1$, следовательно, для источника в начале передачи режим соответствует индуктивной нагрузке, реактивная мощность поступает в линию. Физически это можно объяснить следующим образом. Протекание тока, большего, чем натуральный, вызывает такие потери реактивной мощности в передаче, которые не компенсируются генерацией $Q_{зар}$ (зарядной мощностью) линии.

При передаче $P_2 < P_n$ ток $\dot{I}_1$ опережает по фазе напряжение $\dot{U}_1$, т. е. для источника на передающем конце ЛЭП представляет собой емкостную нагрузку. Избыточная генерируемая мощность передачи (при относительно малых потерях ΔQ , так как $\dot{I}_2 < I_n$) должна потребляться системой (генераторами, реакторами, потребителями) на передающем конце, т. е. в начале линии. Напомним, что такие режимы получаются при условии, что на приемном конце $Q_2=0$.

В-третьих, чтобы обеспечить номинальные уровни напряжения в начале передачи в режимах, отличных от натурального, необходимо отказаться от искусственно введенного условия, когда $Q_2=0$.

2.5. Активная и реактивная мощность передачи при регулировании напряжения в ее начале и конце

Перепишем первое уравнение передачи (2.23а)

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \lambda + jZ_c \frac{\dot{I}_2^* \dot{U}_2}{\dot{U}_2^*} \sin \lambda,$$

откуда следует

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \lambda + jZ_c \frac{P_2 - jQ_2}{\dot{U}_2^*} \sin \lambda.$$

Сориентируем вектор $\dot{U}_2$ вдоль вещественной оси ($\dot{U}_2 = U_2$) и, используя угол δ , запишем комплексное значение $\dot{U}_1$ через вещественную и мнимую составляющие. Предшествующее равенство тогда примет вид:

$$U_1 \cos \delta + jU_1 \sin \delta = U_2 \cos \lambda + \\ + Z_c \frac{Q_2}{U_2} \sin \lambda + jZ_c \frac{P_2}{U_2} \sin \lambda. \quad (2.25)$$

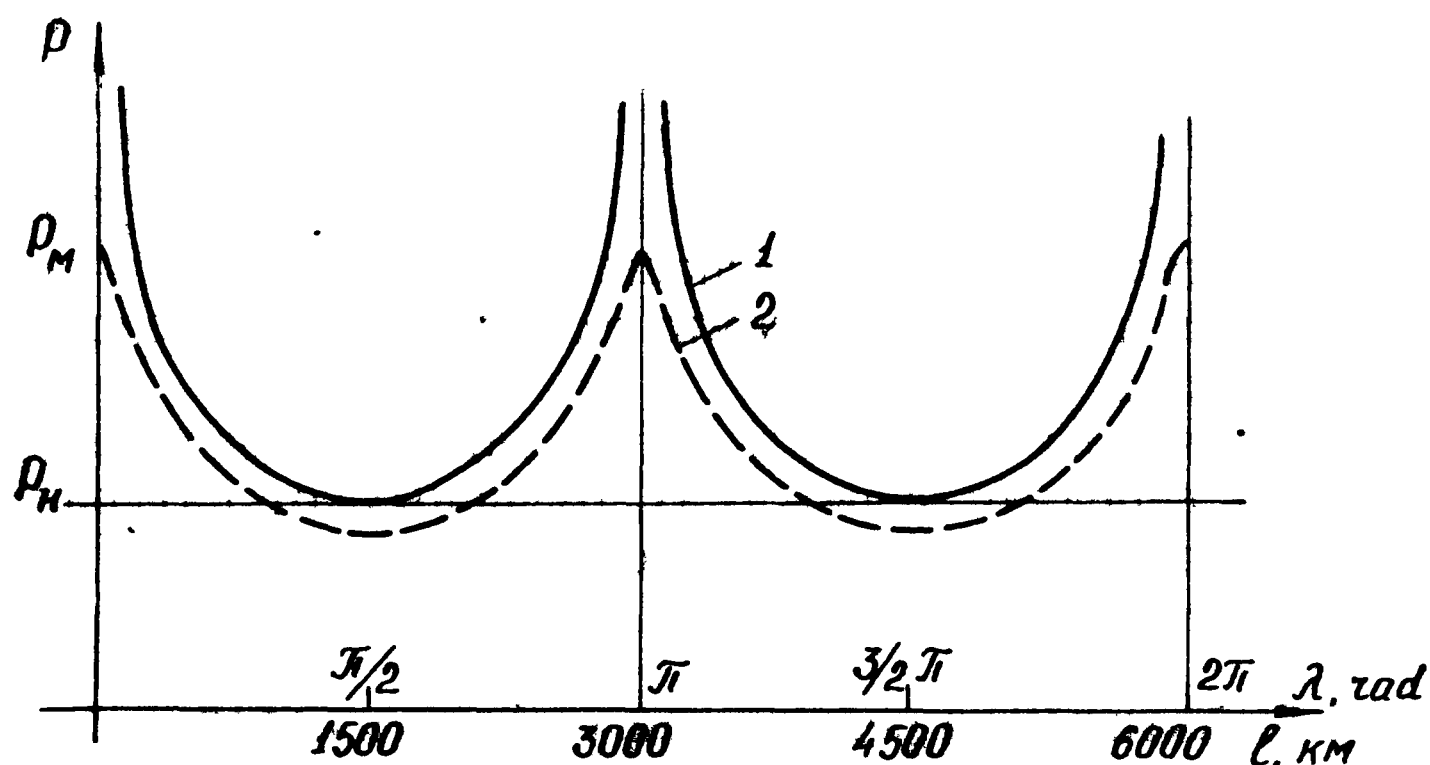
Рассмотрим соотношение между мнимыми составляющими левой и правой частей (2.25):

$$U_1 \sin \delta = Z_c \frac{P_2}{U_2} \sin \lambda.$$

Отсюда передаваемая активная мощность

$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \lambda} \sin \delta = P_m \sin \delta. \quad (2.26)$$

Максимальная мощность передачи P_m при заданных значениях



Р и с. 2.5. Предел передаваемой мощности:

1 — для идеальной линии; 2 — с учетом потерь

напряжения начала и конца зависит от волновой длины λ . Эта зависимость представлена на рис. 2.5. Из нее видно, что минимальную пропускную способность ($P_m = P_n$) имеет передача с волновой длиной в четверть волны ($l = 1500$ км). Идеальные передачи длиной 3000 км имеют неограниченную пропускную способность. На рис. 2.5 пунктиром показана зависимость $P_m(l)$ для реальных линий ($r_0 \neq 0$), из которой видно, что ограничение по пропускной способности для линий $\lambda = \pi$ существует, но оно в несколько раз превышает значение P_n . Передачи в диапазоне от 750 до 2250 км попадают в неблагоприятный диапазон с пониженной пропускной способностью.

При определении пределов передаваемой мощности ЛЭП относительно небольшой длины до 300 км ($\lambda < 18^\circ$) обычно используют более простое известное выражение, вытекающее из (2.26) при условии, что для малых углов $\sin \lambda \approx \lambda = \sqrt{x_0 y_0}$:

$$P_2 = \frac{U_1 U_2 \sin \delta}{\sqrt{x_0/y_0} \sqrt{x_0 y_0} l} = \frac{U_1 U_2}{x_0 l} \sin \delta = \frac{U_1 U_2}{x} \sin \delta. \quad (2.27)$$

Перейдем к анализу реактивной мощности ДЭП. Рассмотрим вещественные составляющие левой и правой частей в (2.25):

$$U_1 \cos \delta = U_2 \cos \lambda + Z_c \frac{Q_2}{U_2} \sin \lambda.$$

Примем условие поддержания равных уровней напряжения начала и конца передачи $U_1 = U_2$. Из последнего выражения получим реактивную мощность конца

$$Q_2 = \frac{\cos \delta - \cos \lambda}{\sin \delta} P_n$$

или в долях от натуральной мощности

$$q_2 = \frac{\cos \delta - \cos \lambda}{\sin \delta}. \quad (2.28)$$

Аналогично можно получить выражение для реактивной мощности начала передачи, если из системы уравнений (2.23) обозначить напряжение конца передачи $\dot{U}_2$ через параметры начала:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \cos \lambda - j Z_c \dot{I}_1 \sin \lambda. \quad (2.29)$$

Сориентируем вектор $\dot{U}_1$ вдоль вещественной оси, тогда при записи вектора $\dot{U}_2$ через вещественную и мнимую составляющие получим:

$$U_2 \cos \delta - j U_2 \sin \delta = U_1 \cos \lambda - j Z_c \frac{P_1 - j Q_1}{U_1}.$$

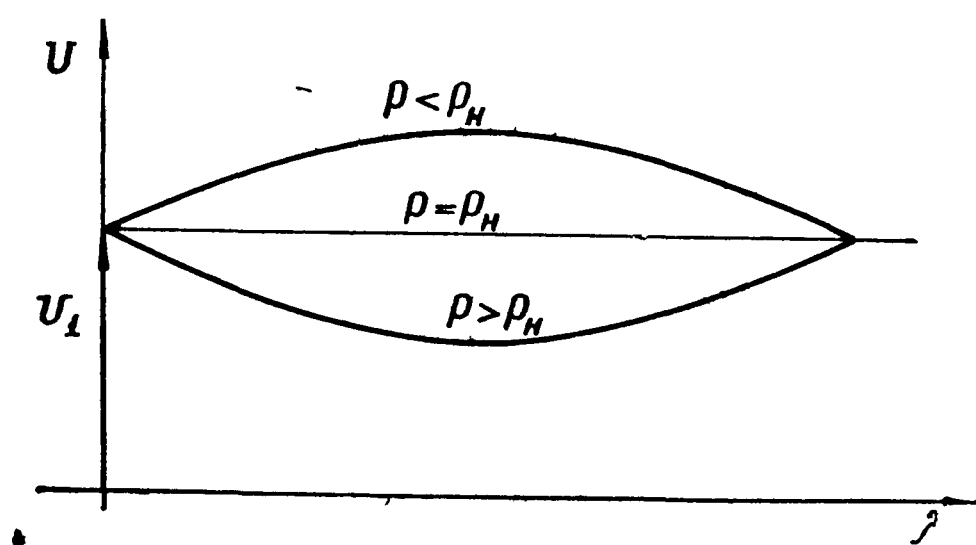
Для вещественных составляющих справедливо

$$U_2 \cos \delta = U_1 \cos \lambda - Z_c \frac{Q_1}{U_1} \sin \lambda.$$

При равенстве напряжений U_1 и U_2 в относительных единицах реактивная мощность начала

$$q_1 = \frac{\cos \lambda - \cos \delta}{\sin \lambda} = -q_2. \quad (2.30)$$

Итак, при регулировании напряжений начала и конца из условия их равенства реактивные мощности начала и конца линии численно равны друг другу и имеют противоположное направление. Если передается активная мощность больше натуральной ($P_2 > P_H$), то потери реактивной мощности ΔQ больше генерации $Q_{\text{зар}}$ и потоки q_1 и q_2 направлены встречно в линию. В центральной части линии напряжение $U_{\text{ср}}$ по величине будет меньше напряжения в концевых точках (рис. 2.6). Если передается активная мощность меньше натуральной ($P_2 < P_H$), то потери $\Delta Q < Q_{\text{зар}}$ и избыточная зарядная мощность равными долями



Р и с 2 6 Диаграмма напряжения вдоль линии при его регулировании по концам передачи

растекаются из линии в приемную и передающую системы. Напряжение в средней части повышается ($U_{\text{ср}} > U_1$), иногда до недопустимых величин, при этом наибольшие неприятности могут быть при отсутствии потока активной мощности ($P_2 = 0$). Для устранения недопустимого повышения величины $U_{\text{ср}}$ необходимы поэтому специальные мероприятия, например включение реакторов на промежуточных переключательных пунктах для компенсации избыточной зарядной мощности линии.

Напряжение в середине линии в относительных единицах может быть найдено по формуле

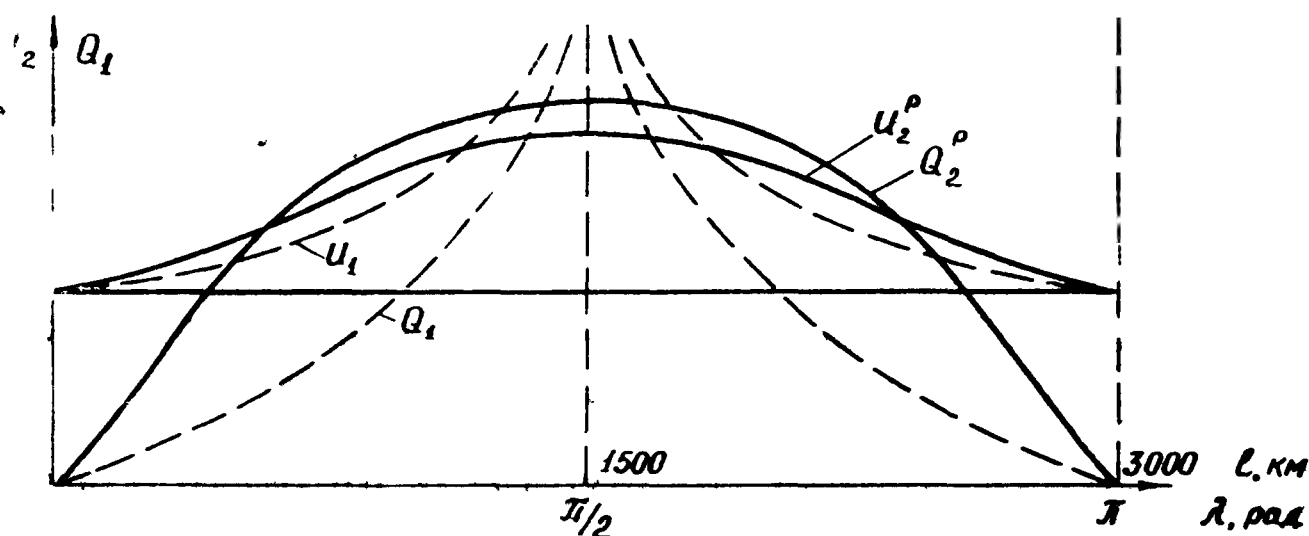
$$U_{\text{ср}} = \frac{\cos \delta/2}{\cos \lambda/2}. \quad (2.31)$$

Глава 3. РЕЖИМЫ И ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ДАЛЬНИХ ПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Особенности линий длиной в четверть волны. Компенсированные электропередачи

Ранее уже было отмечено, что среди всех передач такая передача ($\lambda = \pi/2$) имеет минимальную пропускную способность $P_m = U_1 U_2 / Z_c$. Однако это не единственный недостаток ДЭП длиной 1500 км.

Рассмотрим режим холостого хода при отключении линии в конце от приемной системы $I_2 = 0$. Первое уравнение передачи (2.23а) записывается как $U_1 = U_2 \cos \lambda$, откуда $U_2 = U_1 / \cos \lambda$. Поскольку $\cos \pi/2 = 0$, напряжение U_2 разомкнутого конца стано-



Р и с. 3 1. Диаграмма напряжений и реактивной мощности линии на холостом ходу

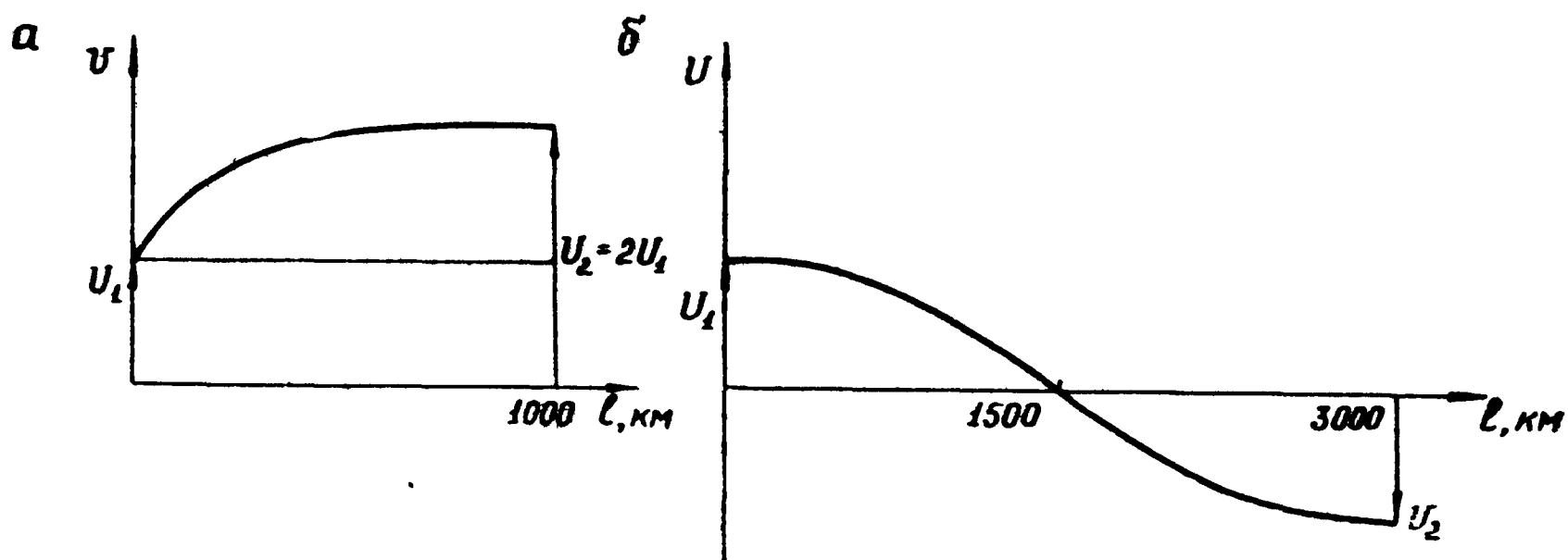
вится равным бесконечности. Естественно, что в реальной линии напряжение повысится до некоторого конечного значения, обычно превышающего номинальное в несколько раз. Из сказанного следует, что холостой ход (без включения реакторов на разомкнутом конце) недопустим. Это относится не только к линиям в четверть волны, но и ко всем другим линиям длиной от 750 до 2000 км. Режим холостого хода опасен еще и перегрузкой генераторов, включенных в начале передачи. Из-за повышенных уровней напряжения генерируемая линией реактивная мощность становится столь большой, что может привести к термическому поражению генераторов. Реактивная мощность начала вычисляется по формуле

$$Q_1 = -\operatorname{tg} \lambda U_1^2 / Z_c; \quad (3.1)$$

теоретически для идеальной линии $l=1500$ км $Q_1=\infty$. На рис. 3.1 показаны функции напряжения $\dot{U}_2$ конца идеальной ДЭП и реактивной мощности ее начала Q_1 в зависимости от волновой длины, те же параметры для реальной линии $\dot{U}_2^p$ и Q_1^p .

На рис. 3.2, а показано распределение напряжений вдоль линии длиной 1000 км в режиме холостого хода. Поскольку $U_2=U_1/\cos 60^\circ=2U_1$, то отступая от конца на расстояние l , можно получить напряжение $U_l=U_2 \cos(\gamma_0 l)$.

Из сказанного следует, что к режимам холостого хода и близким к ним с повышенной избыточной реактивной мощно-



Р и с. 3.2. Распределение напряжения вдоль линии на х.х.:
а — длиной линии 1000 км; б — длиной 3000 км

стью, генерируемой линией, необходимо внимательное отношение как при проектировании, так и при эксплуатации ДЭП.

Работа генераторов на емкостную нагрузку, кроме того, может привести к явлению самовозбуждения. Поскольку полностью избавиться от указанных режимов не удастся, их рассматривают как особые режимы ДЭП.

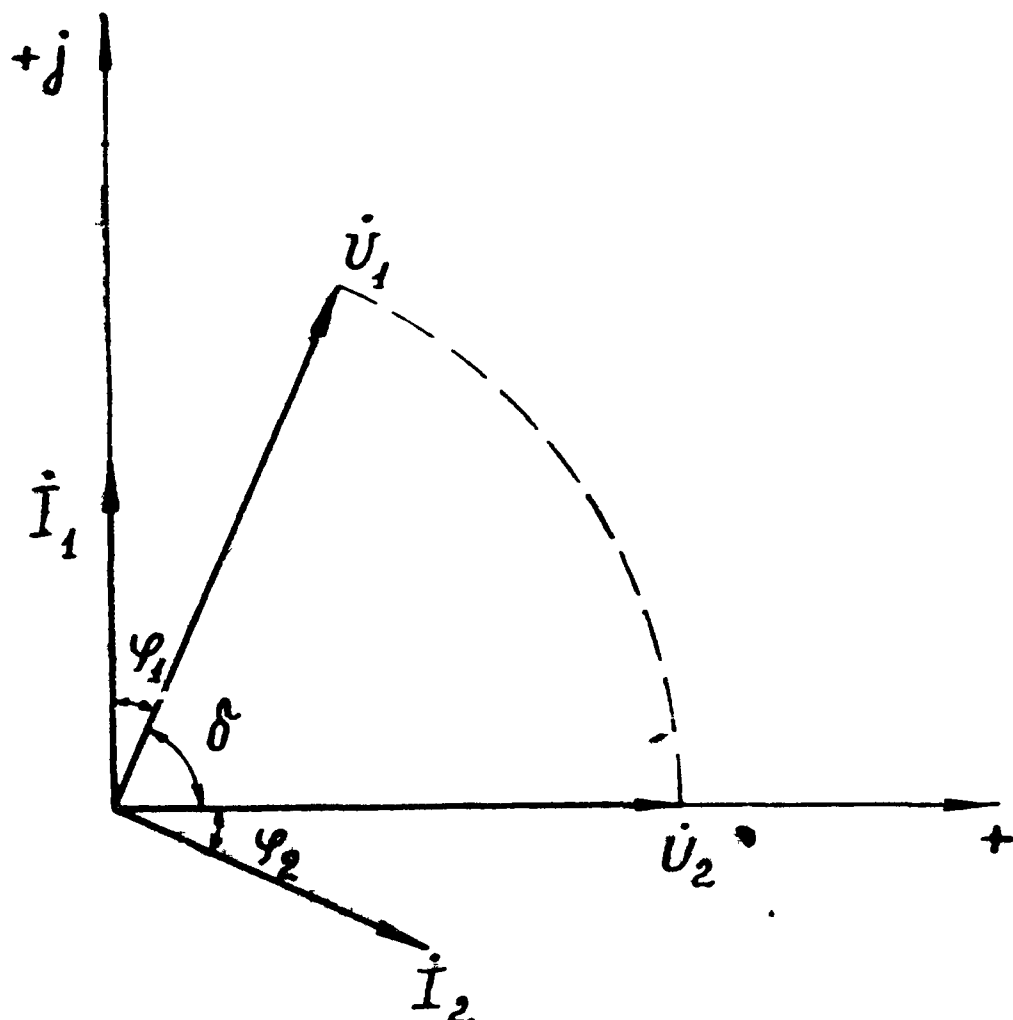
Рассмотрим нагрузочный режим линии в четверть волны. Уравнения (2.23) принимают вид:

$$U_1 = jZ_c \dot{I}_2, \dot{I}_1 = j\dot{U}_2/Z_c, \quad (3.2)$$

из чего следует, что напряжение $\dot{U}_2$ не зависит от напряжения $\dot{U}_1$, а ток $\dot{I}_2$ не зависит от тока $\dot{I}_1$. Более того, изменение нагрузки на приемном конце при фиксированном уровне $\dot{U}_2$ возможно лишь за счет изменения тока $\dot{I}_2$, что, в свою очередь, влечет изменение напряжения $\dot{U}_1$. Поскольку регулировочный диапазон

напряжения невелик ($\pm 10—15\%$), то и возможности по регулированию передаваемой мощности оказываются ограниченными.

На рис. 3.3 показана диаграмма токов и напряжений линии, имеющих волновую длину $\lambda/2$. Угол δ между напряжениями $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ всегда зависит только от φ_2 , так как $\delta = \pi/2 - \varphi_2$. В свою очередь, ток $\dot{I}_1$ опережает напряжение $\dot{U}_1$ на угол $\varphi_1 = \varphi_2$, т. е.



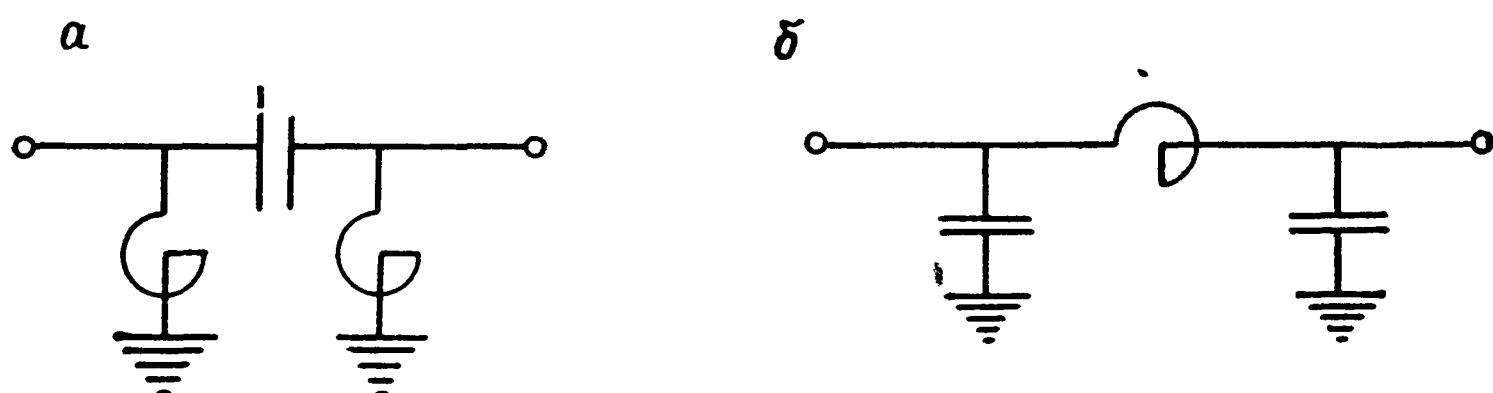
Р и с. 3 3. Векторные диаграммы напряжений и токов линии в четверть волны

при активно-индуктивном характере нагрузки в конце передачи $\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2$ на вход ЛЭП подается активно-емкостная нагрузка $\dot{S}_1 = P_1 - jQ_1$. При чисто активной нагрузке в конце передачи $\varphi_2 = 0$. Угол $\delta = 90^\circ$, т. е. при любой величине передаваемой мощности всегда наблюдается предел по статической устойчивости такой передачи.

Отмеченные обстоятельства, среди которых главным является пониженная пропускная способность ДЭП, близких к четверти длины волны, приводят к необходимости разработки способов искусственного снижения волновой длины. Такое снижение параметра λ называется компенсацией, а линии, следовательно, компенсированными. Способы компенсации вытекают непосредственно из формулы $\lambda = \sqrt{X Y}$. Для уменьшения λ необходимо

снижение либо индуктивного сопротивления X , либо емкостной проводимости Y , либо и того и другого вместе. Уменьшение параметра X достигается за счет последовательного включения в расщелку линии конденсаторов, сопротивление которых X_k компенсирует индуктивность X . Уменьшение параметра Y достигается включением шунтирующих реакторов с проводимостью Y_p , компенсирующих емкостную проводимость линии на землю [3].

Обычно используется комплексная компенсация X и Y при-



Р и с 34. Компенсация (а) и настройка (б) волновой длины линии

близительно в одинаковой пропорции (рис. 3.4, а). Если степень компенсации C одинакова для параметров X и Y

$$C_x = X_k/X, C_y = Y_p/Y,$$

то волновое сопротивление передачи Z_c остается неизменным. При этом максимальная мощность передачи (2.26) увеличивается с возрастанием C , так как при равенстве напряжений начала и конца

$$P_m = P_n / \sin^2(1 - C) \lambda. \quad (3.3)$$

Например, если параметры ДЭП с волновой длиной $\pi/2$ скомпенсированы на 50%, то отношение пропускной способности компенсированной передачи P_m^k к мощности некомпенсированной линии P_m^0 составит $P_m^k/P_m^0 = \sqrt{2}$.

Необходимая степень компенсации передачи определяется из условия обеспечения требуемой пропускной способности линии с учетом 20% запаса по статической устойчивости $P_m^k = 1,2 P_{2m}$. Здесь P_{2m} — максимальная передаваемая мощность от станции на передающем конце в приемную систему. Рассмотрим задачу в упрощенной постановке без учета потерь мощности в линии. Как правило, передача должна быть двухцепной из условия резервирования и надежности.

Введем обозначения: Z_c^0, λ^0 — параметры ДЭП без компенсации; Z_c^k, λ^k — параметры компенсированной передачи. Соот-

ветственно пропускная способность для той и другой передачи определяется формулами:

$$P_m^0 = U_1 U_2 / (Z_c^0 \sin \lambda_0), \quad P_m^K = U_1 U_2 / (Z_c^K \sin \lambda^K). \quad (3.4)$$

Примем за основу комбинированный способ компенсации как продольных, так и поперечных параметров в одинаковой пропорции $C = C_x = C_y$. В этом случае $Z_c^K = Z_c^0$.

Пусть $P_m^0 < 1,2P_{2m}$, т. е. требуемая пропускная способность при данном классе напряжения не обеспечивается. Возможны два решения. Первое заключается в переходе к более высокому напряжению. Например, требуется спроектировать ДЭП для передачи мощности $P_2 = 3000$ МВт на расстояние $l = 1200$ км. Необходимо обеспечить пропускную способность $P_m = 3600$ МВт. Рассмотрим ДЭП 500 кВ: натуральная мощность на две цепи $P_H = 1720$ МВт, $\lambda^0 = 72^\circ$, $P_m^0 = P_H / \sin \lambda^0 = 1810$ МВт. Так как $P_m^0 < 3600$ МВт, то в качестве варианта проекта следует рассмотреть ДЭП 750 кВ: $P_H = 4280$ МВт, $P_m^0 = 4500$ МВт. В такой передаче компенсация вообще не требуется, так как обеспечивается запас по статической устойчивости более 20%.

Второе решение состоит в определении степени компенсации C на первоначально выбранном классе напряжения. Из выражения (3.4) для компенсированной передачи $P_H / \sin \lambda^K = P_m^K$, откуда волновая длина

$$\lambda^K = \arcsin (P_H / P_m^K). \quad (3.5)$$

Необходимая степень компенсации

$$C = (\lambda_0 - \lambda^K) \lambda^0. \quad (3.6)$$

Для рассматриваемого примера при классе напряжения 500 кВ

$$\lambda^K = \arcsin (1720/3600) = 28,5^\circ, \quad C = (72 - 28,5) 72 = 0,6,$$

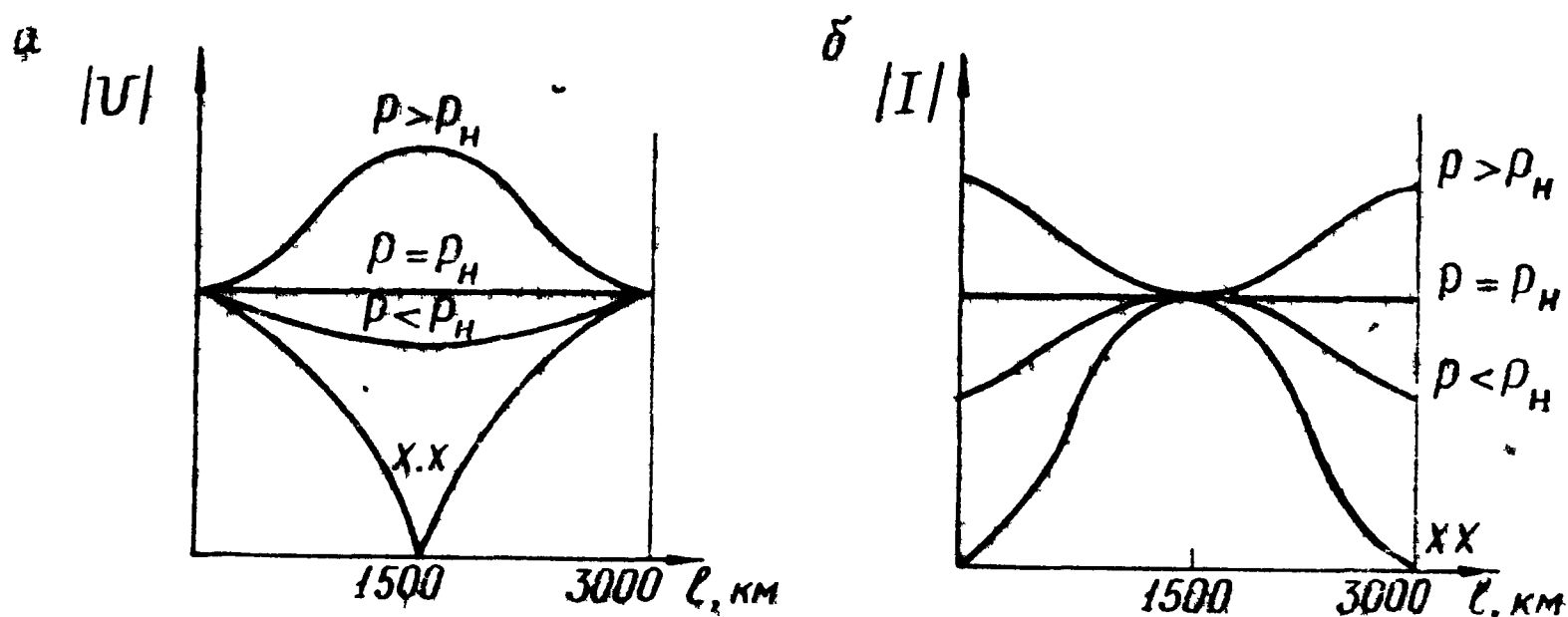
т. е. для обеспечения требуемой пропускной способности ДЭП необходимо параметры и волновую длину скомпенсировать на 60%. Техничко-экономическое сопоставление двух вариантов на основании первого и второго решений позволит окончательно выявить направление проектной разработки.

3.2. Особенности линии длиной в половину волны. Настроенные электропередачи

Линия длиной $l=3000$ км имеет волновую длину $\lambda=\pi$. Ее пропускная способность практически не ограничена (см. рис. 2.5). В отличие от рассмотренной выше линии в четверть волны, полуволновые линии не имеют отмеченных выше недостатков на х.х и в нагрузочных режимах. Действительно, из уравнений передачи (2.23) при $\cos \pi = -1$ и $\sin \pi = 0$ следует, что

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_2, \dot{I}_1 = -\dot{I}_2, \quad (3.7)$$

для любых режимов, в том числе для холостого хода $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = 0$.



Р и с. 3.5. Распределение напряжений (а) и токов (б) в линии длиной в полуволну

Напряжение и ток начала соответственно сдвинуты по фазе по отношению к концу всегда на 180° .

Интересно проанализировать напряжение и ток в середине линии:

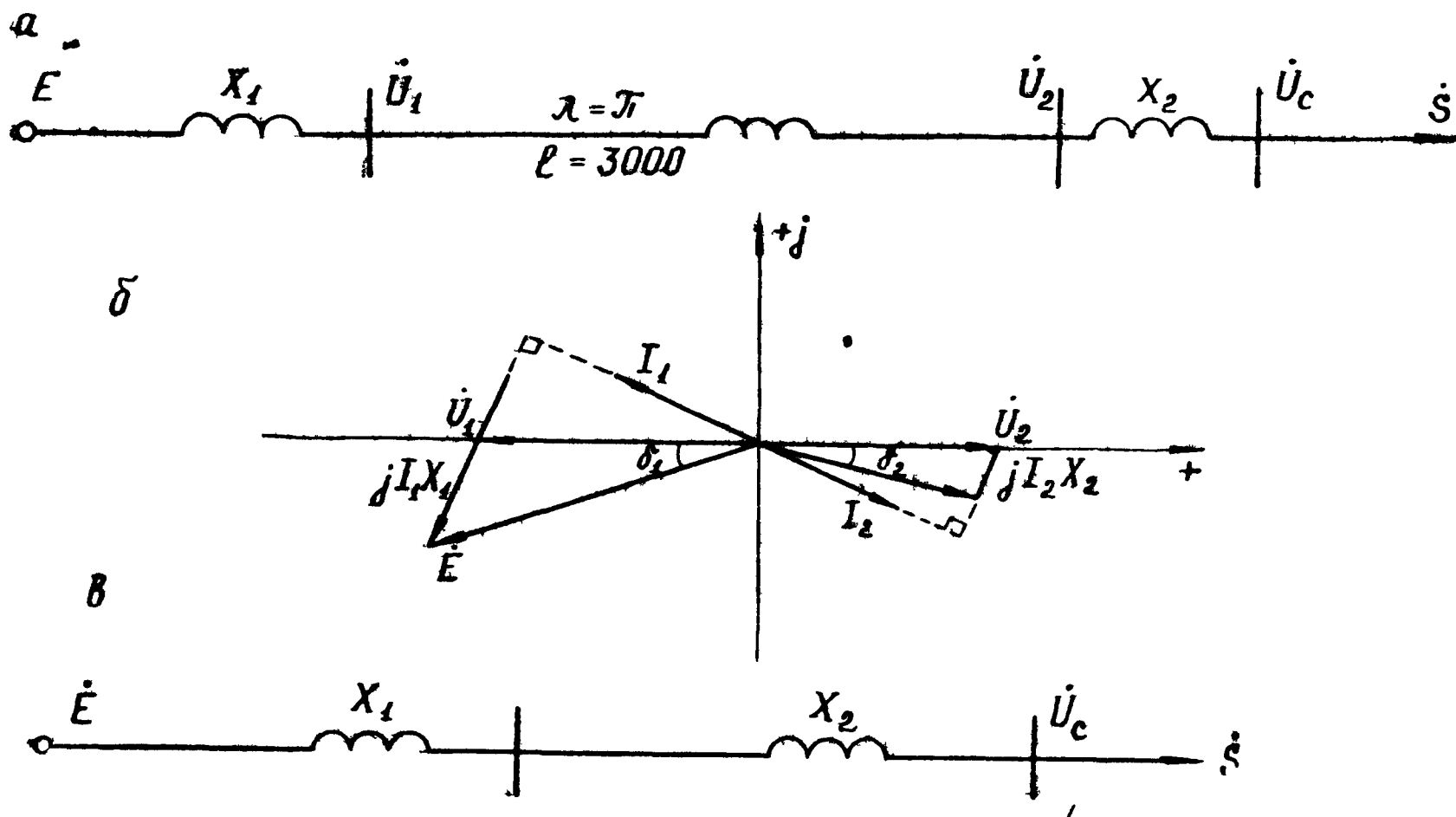
$$\dot{U}_{\text{ср}} = jZ_c \dot{I}_2, \dot{I}_{\text{ср}} = j\dot{U}_2 / Z_c = j\dot{I}_n.$$

На холостом ходу $U_{\text{ср}}^{\text{х.х}} = 0$. При передаче натуральной мощности ($I_2 = I_n$) напряжение середины линии по величине не отличается от напряжений начала и конца¹. На рис. 3.2, б показано распределение напряжения вдоль линии в режиме холостого хода. Распределение тока и напряжения по модулю в различных режимах от холостого хода до $P > P_n$ показано на рис. 3.5.

¹ Ток в средней части линии не зависит от режима и по величине всегда равен натуральному току.

Таким образом, х.х, с точки зрения перегрузки генераторов и работы изоляции передачи, не встречает затруднений. То же самое можно сказать и о нагрузочном режиме со стороны регулирования мощности в широком диапазоне.

В нагрузочном режиме передача ведет себя так, как будто она не существует. Предел передаваемой мощности самой линией не ограничивается и определяется параметрами передающей и приемной систем. На рис. 3.6 дана схема замещения, включающая в себя станцию с ЭДС $\dot{E}$ и сопротивлением X_1 , ДЭП с вол-



Р и с. 3.6. Нагрузочный режим линии длиной в полуволну:

a — схема замещения сети; *б* — векторная диаграмма; *в* — эквивалентная сеть без дальней передачи

новой длиной $\lambda = \pi$ и приемную систему, в которой за сопротивлением X_2 поддерживается неизменным напряжение $\dot{U}_c$. Углы δ_1 и δ_2 показывают сдвиг по фазе напряжения на участках X_1 и X_2 . Из векторной диаграммы следует (рис. 3.6, б), что

$$\dot{E} = -\dot{U}_c - j\dot{I}_2(X_1 + X_2),$$

откуда

$$\dot{I}_2 = j(\dot{E} + \dot{U}_c)/(X_1 + X_2).$$

Следовательно,

$$P = \text{Re}[\dot{S}] = \text{Re}[\dot{I}_2^* \dot{U}_c] = \text{Re}[j(\dot{E} \dot{U}_c + U_c^2)/(X_1 + X_2)].$$

Учитывая, что $\vec{E}^* = -E \cos \delta_1 + jE \sin \delta_1$ и $\vec{U}_c = U_c \cos \delta_2 - jU_c \sin \delta_2$, получаем

$$P = (EU_c \sin \delta_1 \cos \delta_2 + EU_c \cos \delta_1 \sin \delta_2) / (X_1 + X_2) = \\ = EU_c \sin (\delta_1 + \delta_2) / (X_1 + X_2).$$

Аналогичное выражение получается для системы, представленной на рис. 3.6, в и не содержащей ЛЭП.

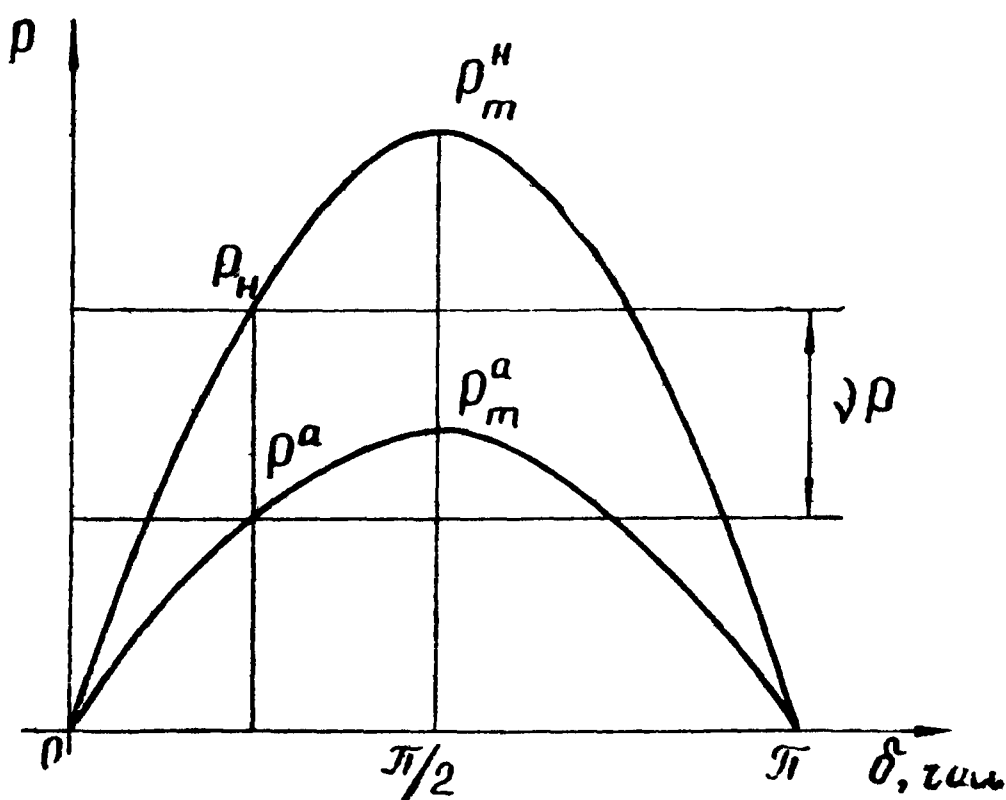
В 1968 г. в СССР был осуществлен уникальный и пока единственный в мире эксперимент по передаче мощности на расстояние 2858 км. Была собрана искусственно схема передачи, включающая в себя участки Волгоград—Москва—Куйбышев—Челябинск—Свердловск на напряжений 500 кВ. Опытным путем были подтверждены теоретические исследования режимов ДЭП полуволновой длины.

Существенным недостатком полуволновых линий является зависимость напряжения середины линии от передаваемой мощности P_2 . Во-первых, при больших значениях P_2 напряжение может быть недопустимым, т. е. необходимы способы его искусственного снижения. Во-вторых, затруднен отбор мощности в средней части при помощи традиционных силовых трансформаторов, поскольку напряжение здесь может колебаться в слишком широком диапазоне от нуля до больших величин. Правда, можно воспользоваться условием, что ток в средней части линии стабилен и равен значению I_H , т. е. построить отбор мощности по принципу трансформаторов тока. Хотя реализация этого принципа возможна, она требует новых технологических разработок, так как предполагаемый силовой трансформатор тока должен иметь не один, а два высоковольтных ввода.

Некоторые привлекательные особенности полуволновых ДЭП привели к появлению проектов так называемых настроенных электропередач. К ним относятся передачи длиной более 2000 км, но менее 3000 км с искусственным увеличением (настройкой) волновой длины λ до значения π . Увеличение волновой длины осуществляется за счет включения дополнительных реакторов последовательно с отдельными участками линии (увеличение индуктивности) и батарей статических конденсаторов, повышающих емкостную проводимость на землю. Однако проекты пока не реализованы главным образом из-за невозможности присоединения к энергосистемам в промежуточных точках. Кроме того, для таких больших расстояний предпочтительнее использовать ППТ.

3.3. Автоматическая аварийная разгрузка и переключательные пункты дальних электропередач

Как было показано выше, режимы передачи активной мощности описываются угловой характеристикой $P = P_m \sin \delta$, где $P_m = U^2 / Z_c \sin \lambda$. Обозначим через P^H максимальную передаваемую мощность в нормальном режиме, P_m^H — максимальную пропускную способность передачи при $\delta = 90^\circ$. Известно, что коэффициент запаса K^H по условиям обеспечения статической устой-



Р и с. 3.7. Угловая характеристика активной мощности электропередачи

чивости должен быть не менее 0,2. Этот коэффициент показывает величину разности $(P_m^H - P^H)$ в долях от мощности нормального режима, т. е. $K^H = (P_m^H - P^H) / P^H$, из чего следует: $P^H = P_m^H / 1,2$.

Послеаварийный режим ДЭП характеризуется новыми параметрами. В двухцепной передаче отключение к. з. в одной из цепей приводит к возрастанию характеристического сопротивления ДЭП вдвое по отношению к предшествующему режиму $Z_c^a = 2Z_c$. Волновая длина передачи сохраняется, так как она не зависит от количества параллельных цепей n . Из сказанного следует, что

$$Z_c = V \sqrt{(x_0/n) / b_0 n}, \quad \lambda = l V \sqrt{(x_0/n) b_0 n}.$$

Обозначим пропускную способность ДЭП в послеаварийном режиме как P_m^a . При отключении одной из двух параллельных цепей $P_m^a = 0,5 P_m^n$, как это показано на рис. 3.7.

Из условия эксплуатации необходимо в ряде случаев предельно использовать пропускную способность электропередач, допуская для нормального электроснабжения и предотвращения потери гидроресурсов на ГЭС работу с запасами устойчивости ниже обычных. Поэтому послеаварийный режим ДЭП в течение некоторого времени разрешается рассматривать как утяжеленный режим с 8%-м запасом по статической устойчивости. Следовательно, допустимая передаваемая мощность в послеаварийном режиме может составить P^a , $P^a = P_m^a/1,08$, что для двухцепной передачи существенно меньше исходной передаваемой мощности P^n . Эта величина в относительных единицах составляет $\bar{P}^a = 0,555$, или 55,5%, при условии, что за базу взята мощность нормального режима.

Если при отключении цепи сохранить мощность генерации станции на передающем конце ДЭП, то произойдет нарушение устойчивости. Для предотвращения такого нарушения используются как простое и эффективное средство отключение без выдержки времени части генераторов и снижение мощности станции до величины, не превышающей P_m^a . Такое отключение получило название автоматической аварийной разгрузки (ААР). Применение ААР в ДЭП позволяет повысить экономичность и надежность объединяемых систем, так как статическая устойчивость в послеаварийном режиме обеспечивается при этом за счет мероприятий, не требующих дополнительных капитальных затрат.

Отключаемая мощность νP при помощи ААР зависит от состава и мощности генерирующего оборудования на станции, так как $\nu P = (P^n - P^a)$. Действительно, если на станции установленной мощностью 1000 МВт работают 10 генераторов по 100 МВт, а по условиям функционирования ААР необходимо отключить 44,5% мощности, то необходимо отключать 5 генераторов суммарной мощностью 500 МВт. Если же на станции работают 5 генераторов по 200 МВт, то в той же ситуации требуется отключить 3 генератора суммарной мощностью 600 МВт.

Теряемая мощность в приемной системе частично компенсируется резервом, а частично в объеме $\gamma \nu P$, где $\gamma \leq 1$, компенсируется отключением потребителей, естественно, нанося тем самым ущерб народному хозяйству. Ущерб и отключаемую мощ-

ность нагрузки можно снизить, если в ДЭП использовать переключательные пункты ПП (см. рис. 1.1) с выключателями для локализации аварии. При к.з. в линии отключается лишь часть цепи, сопротивление такой передачи в послеаварийном режиме оказывается больше по сравнению с передачей без ПП. Следовательно, возрастают P_m^a и P^a , что приводит к уменьшению отключаемой мощности νP . Нетрудно убедиться, что сопротивление передачи и волновое сопротивление Z_c^a в послеаварийном режиме при различном числе m переключательных пунктов определяются по формулам:

$$X^a = X^n (2 + m)/(1 + m); Z_c^a = Z_c (2 + m)/(1 + m),$$

а это означает, что пропускная способность ДЭП в послеаварийном режиме

$$P_m^a = P_m (1 + m)/(2 + m). \quad (3.8)$$

Отключаемая мощность при помощи ААР в зависимости от числа переключательных пунктов должна быть не менее величины

$$\begin{aligned} \nu P &= P^n - P^a = P^n - 1,2 P^n \frac{(1 + m)}{(2 + m)} \frac{1}{1,08} = \\ &= P^n \left[1 - 1,111 \frac{(1 + m)}{(2 + m)} \right]. \end{aligned}$$

Выбор числа переключательных пунктов становится типичной технико-экономической задачей, в которой увеличение m , с одной стороны, приводит к уменьшению ущерба, а с другой — к дополнительным затратам на сооружение и эксплуатацию переключательных пунктов. Расчеты вариантов при различном значении m позволяют найти оптимальное решение с минимальными суммарными издержками. Упрощенно оценку приведенных затрат можно сделать по формуле

$$Z = 0,125mA + \gamma \nu PTC, \quad (3.9)$$

в которой A — капиталовложения на один ПП; γ — коэффициент, характеризующий неполное отключение нагрузки потребителей за счет резерва мощности; νP — вероятное среднегодовое время простоя передачи из-за аварий; C — удельный ущерб. Формула написана для нормативного коэффициента эффективности капиталовложений, равного 0,125.

3.4. Схема дальней передачи переменного/тока

Рассмотрим характеристики и схему первой в мире компенсированной ДЭП напряжением 500 кВ Куйбышев—Москва. Заметим, что принципы, положенные в основу этой передачи, стали использоваться в той или иной мере во всех последующих ДЭП. Передача строилась в два этапа, на первом была пущена одна цепь без компенсации на напряжение 400 кВ. Затем было признано целесообразным ввести новый класс напряжения (500 кВ) и отказаться от использования напряжения 400 кВ. Так как оказалось, что изоляция передачи позволяла перейти на новое напряжение, то замене были подвергнуты только трансформаторы на Волжской ГЭС им. В. И. Ленина и в приемной системе Мосэнерго. В результате было обеспечено существенное повышение пропускной способности передачи. На втором этапе, который закончился в 1959 г., во-первых, была введена вторая параллельная цепь, во-вторых, были построены переключательные пункты, на одном из которых установлены устройства продольной и поперечной компенсации (рис. 3.8).

Перевод всей передачи на напряжение 500 кВ был закончен в 1964 г., при этом была повышена передаваемая мощность до 1800 МВт. Длина передачи $l=850$ км. На передающем конце установлены гидрогенераторы 20×115 МВт, т. е. $P_1=2300$ МВт. Натуральная мощность каждой цепи составляет 908 МВт, в целом для передачи — 1816 МВт.

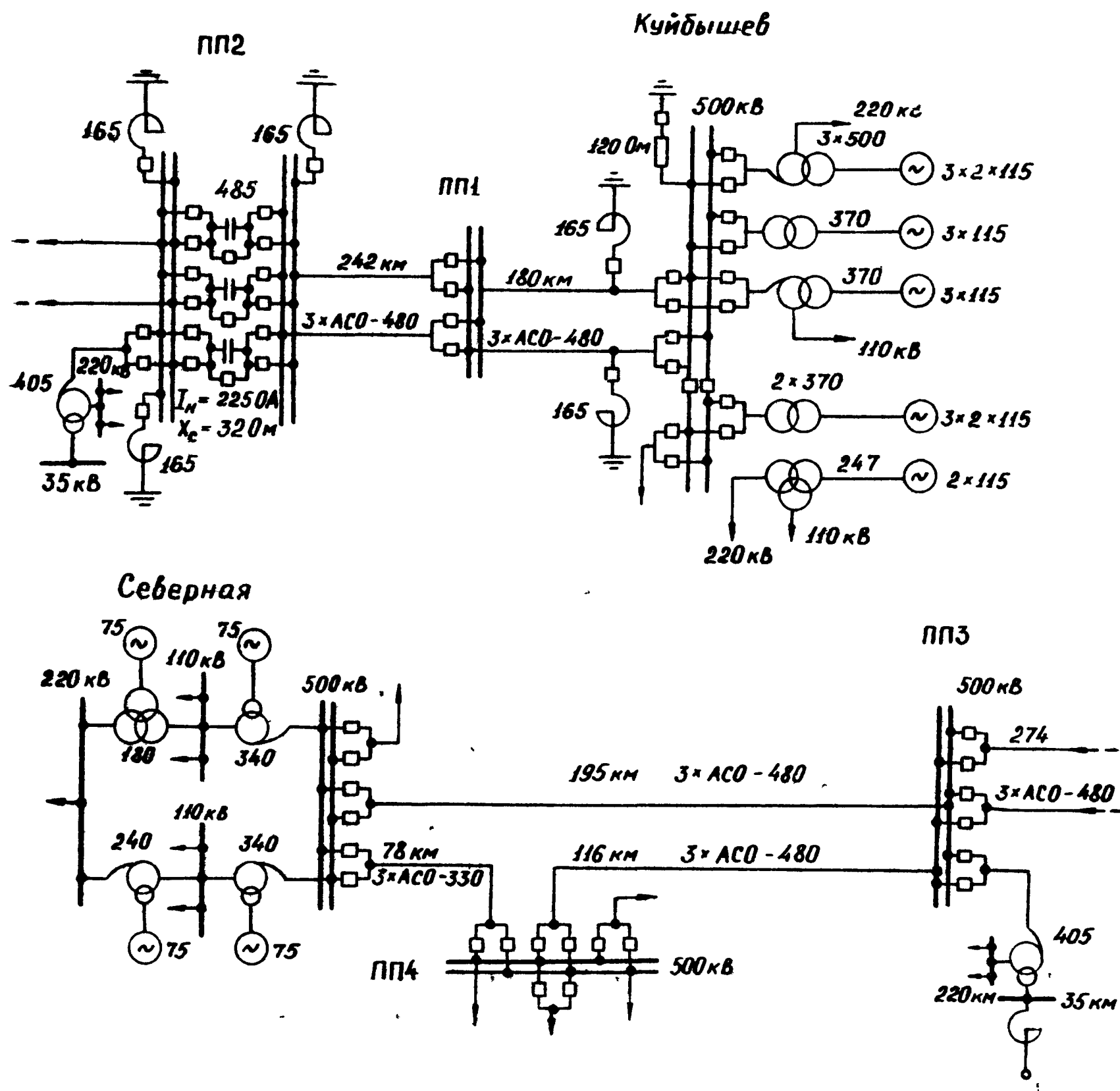
Перечислим основные мероприятия и технические решения, принятые в передаче для повышения пропускной способности и коэффициента полезного действия.

1. Впервые применено расщепление проводов на 3, что позволило уменьшить потери на корону и индуктивное сопротивление на 28% по сравнению с одним проводом в фазе. Применен провод АСО-480×3. Характеристическое сопротивление одной цепи равно 276 Ом.

2. Сооружение трех переключательных пунктов. Каждая линия разбита на четыре приблизительно одинаковых участка. Повреждение ЛЭП приводит к отключению одного такого участка и возрастанию сопротивления передачи в послеаварийном режиме на 25%. Для сохранения динамической устойчивости применено быстродействующее отключение ЛЭП и ААР.

3. Применена продольная компенсация конденсаторами, что приблизительно на 26% снизило индуктивное сопротивление линии. Мощность батареи конденсаторов 500 МВар. Поперечная компенсация реакторами выполнена приблизительно в той же

пропорции. Наличие реакторов уменьшает результирующую генерацию линии и тем самым уменьшает потоки реактивной мощности в передаче, снижает потери мощности и выравнивает напряжение в промежуточных точках.



Р и с. 3.8. Принципиальная проектная схема электропередач 500 кВ

4. Применено сильное регулирование напряжения, благодаря чему $U_1 = \text{const}$ и $U_2 = \text{const}$.

5. На приемном конце установлены синхронные компенсаторы, которые, во-первых, поддерживают на необходимом уровне напряжение, во-вторых, при передаче активной мощности больше натуральной обеспечивают встречный поток реактивной мощности в сторону линии.

6. На передающем конце установлены шунтирующие реакторы для поглощения избыточной реактивной мощности ЛЭП на холостом ходу и в режимах передачи активной мощности меньше натуральной.

Передача Куйбышев—Москва в дальнейшем стала выполнять функции межсистемной связи между параллельно работающими энергосистемами. Появились проблемы регулирования напряжения, частоты и активной мощности в таких межсистемных связях. Были разработаны новые виды системной автоматики, функционирование которых тесно связано с режимами и свойствами ДЭП. Главной особенностью режима межсистемной связи является нестабильность передаваемой мощности, объясняемая нерегулярными и непредвиденными колебаниями нагрузки в объединяемых энергосистемах. Возможно опасное изменение перетока мощности при внезапных нарушениях баланса мощности в отдельных энергосистемах.

Схемы электропередач СВН и УВН могут отличаться друг от друга в зависимости от функциональной роли ДЭП, ее длины, передаваемой мощности и расположения в ЭЭС. Однако основные принципы, перечисленные выше и продемонстрированные на примере ДЭП Куйбышев—Москва, претерпевают существенное изменение в направлении совершенствования и развития средств автоматики, способов и средств управления поперечной компенсацией, методов и средств, включая ЭВМ, ведения режима и повышения его экономичности. Уделяется большое внимание применению методов автоматического повторного включения и повышению скорости его действия, ограничению перенапряжений и снижению габаритов оборудования ДЭП УВН, его экологическому воздействию и другим вопросам.

3.5. Повышение пропускной способности электропередач при помощи регулируемых источников реактивной мощности

Одной из наиболее важных функций ДЭП переменного тока является увеличение предела передаваемой мощности и повышение статической устойчивости генераторов, работающих на передачу. Наибольшее внимание уделяется возможности автоматического управления поперечной компенсацией при помощи управляемых источников реактивной мощности (УИРМ). Наиболее совершенными источниками являются синхронные компенсаторы (СК), обеспечивающие через сильное регулирование постоянство напряжения в промежуточных точках ДЭП в местах их присоединения (рис. 3.9).

ДЭП как бы разбивается на ряд самостоятельных участков, напряжение концевых точек которых регулируется и поддерживается неизменным. Тогда пропускная способность ДЭП определяется не всей ее волновой длиной λ , а длиной отдельных участков. Пусть переключательные пункты с УИРМ установлены на равном расстоянии, они делят передачу на n равных участков. Тогда

$$P_m = U^2 / \{ Z_c \sin (\lambda / n) \}. \quad (3.10)$$

Например, передача длиной $l=1000$ км имеет пропускную способность $P_n / \sin 60^\circ$, равную $1,16 P_n$. При поддержании $U = \text{const}$ в двух промежуточных точках, как это показано на рис. 3.9,

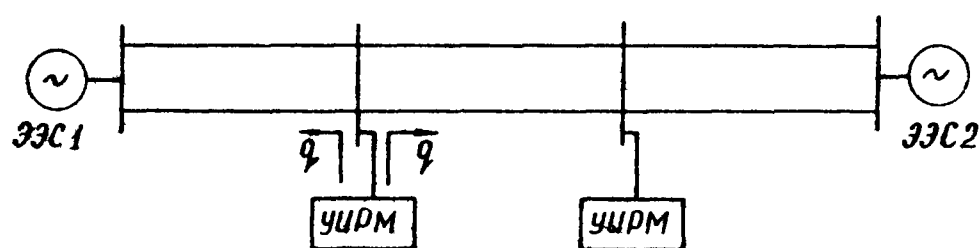


Рис. 3.9. Размещение управляемых источников реактивной мощности

волновая длина участка 333 км равна 20° и $P_m = 2,93 P_n$. Пропускная способность ДЭП возрастает в 2,5 раза.

Основная проблема здесь состоит в высокой стоимости УИРМ из-за необходимой большой реактивной мощности поперечной компенсации. Чтобы передать по каждому из участков активную мощность, например равную $2 P_n$, в рассматриваемой выше передаче длиной 1000 км требуется обеспечить встречные потоки реактивной мощности на каждом участке $q_1 = -q_2$. Из формулы (2.26) следует, что

$$2P_n = P_n \sin \delta / \sin 20^\circ,$$

откуда сдвиг напряжения по фазе на каждом участке составляет $\delta' = 43^\circ$. На основании соотношения (2.30)

$$q_1 = -q_2 = (\cos 20^\circ - \cos 43^\circ) / \sin 20^\circ = 0,61.$$

Таким образом, реактивная мощность каждого УИРМ должна составлять $1,22 P_n$. Конечно, не вся эта мощность должна покрываться синхронными компенсаторами. Наибольшая ее часть может генерироваться батареями статических конденсаторов и лишь небольшая доля при помощи СК, регулирующих напряжение по закону $U = \text{const}$.

Кроме рассмотренного закона регулирования напряжения возможно использование другого закона регулирования реактивной мощности УИРМ.

Поставим следующую задачу. Результирующую проводимость ДЭП на землю Y регулировать таким образом, чтобы любая передаваемая мощность P равнялась натуральной мощности передачи P_n при новом регулируемом значении Y_p . Это условие эквивалентно другому условию, которое можно сформулировать следующим образом: при любой передаваемой мощности P углы δ и λ_p должны быть равны друг другу (здесь индекс p указывает на регулируемость параметра).

Из первой формулировки следует, что

$$U^2/Z_{cp} = P, \quad \sqrt{X/Y_p} = U^2/P, \quad Y_p = XP^2/U^4.$$

Чтобы удвоить передаваемую мощность, необходимо в четыре раза увеличить проводимость на землю, а это приводит к необходимости большой дополнительной генерации реактивной мощности на ПП при помощи УИРМ. Привлекательность такого регулирования режима заключается в том, что при этом успешно решается проблема статической устойчивости. Вместо традиционной угловой синусоидальной характеристики передачи $P = P_m \sin \delta$ получается линейная зависимость $P = K\delta$, для которой отсутствует предел по устойчивости. Действительно, если $P = P_n$ и $\delta = \lambda_p = \sqrt{XY_p}$, то (2.26) преобразуется к виду:

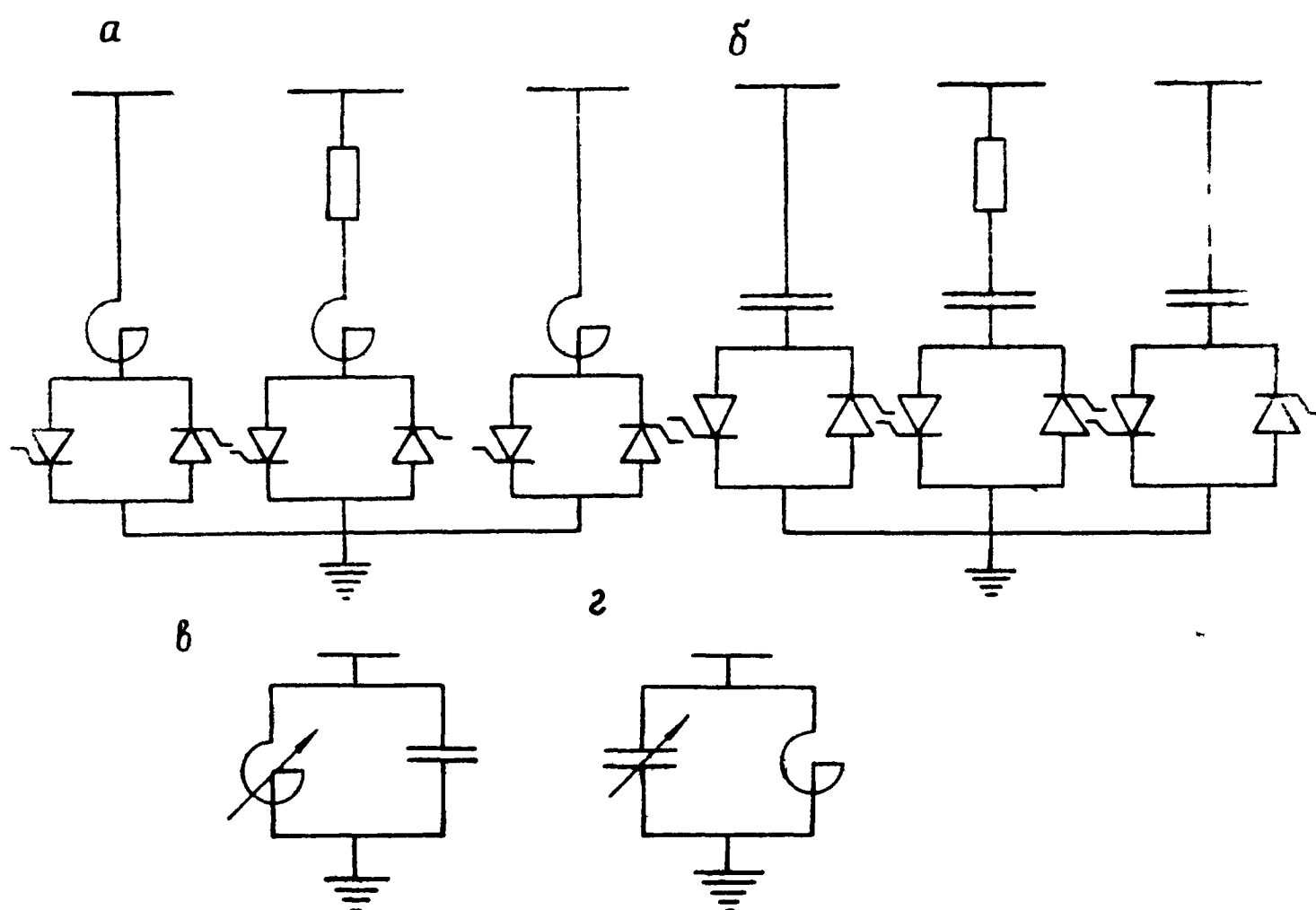
$$P = U^2/(Z_{cp}\lambda_p) \sin \delta = U^2 \sqrt{Y_p}/\sqrt{X} = U^2 \sqrt{XY_p}/X^2 = U^2\delta/X.$$

Применение управляемой поперечной компенсации может быть экономически оправданным лишь при разработке УИРМ с невысокой стоимостью. Использование для этих целей дорогих СК не дает экономического эффекта. Уделяется большое внимание поэтому новым регулируемым источникам. Одним из направлений является создание дешевых управляемых реакторов. Здесь рассматриваются два способа. Во-первых, используется идея регулирования сопротивления реактора с железом за счет регулирования тока подмагничивания. Были попытки использования для этих целей магнитопроводов и обмоток силовых трансформаторов, статорных цепей и частей синхронных машин и др. Однако большие затраты на электротехническую сталь не обеспечили успех этого способа. Во-вторых, используются обычные реакторы без магнитопровода, но с тиристорным регулированием тока потребления (рис. 3.10, а). Поскольку в режимах передачи мощности больше натуральной требуется до-

полнительная генерируемая мощность, то такие управляемые реакторы устанавливаются параллельно с мощными батареями конденсаторов (рис. 3.10, б).

Второе направление связано с разработкой тиристорно управляемых источников реактивной мощности на базе СК (рис. 3.10, в) и включением их в ДЭП параллельно с реакторами (рис. 3.10, г), необходимость в которых может возникать при передаче малой активной мощности.

Биполярно включенные тиристоры в каждой фазе обеспечивают регулирование длительности протекания тока в обоих по-



Р и с. 3.10. Виды устройств управляемых источников реактивной мощности

лупериодах синусоидально изменяющегося приложенного напряжения, т. е. обеспечивают регулирование мощности потребления (генерации) по первой гармонике тока. В условных схемах (см. рис. 3.10) не показаны устройства управления тиристорами и способы их подключения, а также сопутствующие фильтры, необходимые для подавления появляющихся высоких гармоник.

Поскольку в настоящее время тиристорная техника быстро совершенствуется, нет оснований сомневаться, что УИРМ найдут широкое применение в ДЭП переменного тока.

Глава 4. ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

Наряду с широко распространенными электропередачами переменного тока, рассмотренными в предыдущих главах, существуют и имеют значительную перспективу распространения электропередачи постоянного тока. Так как все электрические системы, действующие в большой энергетике, являются системами переменного тока, то ППТ всегда связывают между собой две системы переменного тока. Структурная схема ППТ изображена на рис. 1.2.

В некоторых случаях электрические системы могут непосредственно примыкать друг к другу. В этих ситуациях связывающая системы линия отсутствует, а выпрямитель и инвертор расположены на одной подстанции. Такие электропередачи называются вставками постоянного тока (ВПТ).

4.1. Историческая справка о передачах постоянного тока и вставках постоянного тока, перспективы их распространения

Первые ППТ появились задолго до создания электропередач переменного тока, когда еще не был решен вопрос о преимуществах той или иной системы производства, передачи и потребления электрической энергии. В 1879 г. в Вене на международной выставке демонстрировалась передача длиной в 4 км, а в конце этого же года в Мюнхене — 60 км. Увеличения мощности в то время добивались за счет повышения напряжения генераторов постоянного тока и их последовательного соединения. Наиболее мощной ППТ в те времена была передача во Франции длиной 260 км, напряжением 125 кВ и передаваемой мощностью 20 МВт (1906 г.)

Однако изобретение Доливо-Добровольским в 1891 г. принципа трехфазного переменного тока подорвало возможности распространения систем постоянного тока. Вновь к ППТ обратились после второй мировой войны в связи с созданием мощных преобразователей тока. Первая опытно-промышленная передача была введена в 1950 г. на трассе Кашира—Москва. Ее длина 120 км, напряжение 200 кВ, мощность 30 МВт. За рубежом первая ППТ введена на о. Готланд в Швеции в 1954 г. Ее длина 98 км, напряжение 100 кВ, мощность 20 МВт.

Наиболее значительная ППТ в СНГ к настоящему времени соединяет Волгоград с Донбассом, она введена в 1962 г. Ее длина 475 км, напряжение 800 кВ, мощность 720 МВт. К настоящему времени ППТ наибольшей протяженности 1700 км действует

в Заире. Ее напряжение 1000 кВ, а мощность 560 МВт. Наиболее мощная ППТ сооружена в Бразилии. Ее мощность 2×3150 МВт, напряжение 1200 кВ, а длина 800 км.

Существует проект ППТ Экибастуз—Центр мощностью 6000 МВт, длиной 2400 км и напряжением 1500 кВ.

Наряду с ППТ широко применяются ВПТ. Первая ВПТ была построена в 1965 г. в Японии (ГЭС Сакума) для связи ЭЭС 50 и 60 Гц Севера и Юга страны. Ее мощность 300 МВт. Наиболее крупная в мире ВПТ построена в г. Выборге в 1984 г. для связи ЭЭС СССР и Финляндии. Ее мощность 1065 МВт.

Всего на начало 1987 г. в мире действовало 36 ППТ и ВПТ общей мощностью 20000 МВт. В период до 1995 г. намечено ввести еще около 30 таких объектов.

Существует обоснованная позиция [4], заключающаяся в том, что оптимальное развитие ЕЭЭС СНГ должно опираться на сооружение сверхмощных и сверхдальних ППТ из Сибири в центральные и западные районы содружества.

Применение ППТ в настоящее время перспективно в следующих случаях:

- для транзитной передачи больших мощностей от удаленных источников к центрам нагрузки;
- межсистемной связи;
- глубоких кабельных вводов в города.

Применение ВПТ целесообразно:

- для секционирования крупных объединенных электроэнергетических систем (ОЭЭС) для управления потоками мощности, обеспечения устойчивой работы слабых межсистемных связей (МСС);
- связи ЭЭС с разными стандартами частоты;
- обеспечения коммерческого экспорта или импорта электроэнергии между ЭЭС разных стран.

4.2. Схемы передач постоянного тока

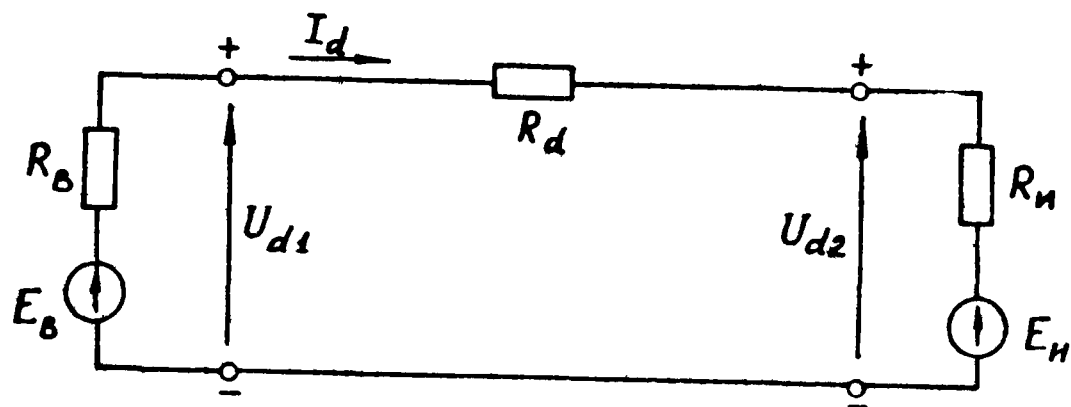
На рис. 4.1 показана схема замещения ППТ, соответствующая рис. 1.2. На схеме обозначены через E_B и E_H эффективные значения ЭДС выпрямителя и инвертора, через U_{d1} и U_{d2} — напряжения в начале и конце ППТ, I_d — ток передачи, R_B и R_H — внутренние сопротивления линии.

Ток в линии

$$I_d = \frac{E_B - E_H}{R_B + R_H + R_d}. \quad (4.1)$$

Мощности, отдаваемая выпрямителем в линию (P_{d1}) и получаема инвертором из линии (P_{d2}), соответственно равны:

$$\left. \begin{aligned} P_{d1} &= U_{d1} I_d; \\ P_{d2} &= U_{d2} I_d. \end{aligned} \right\} \tag{4.2}$$



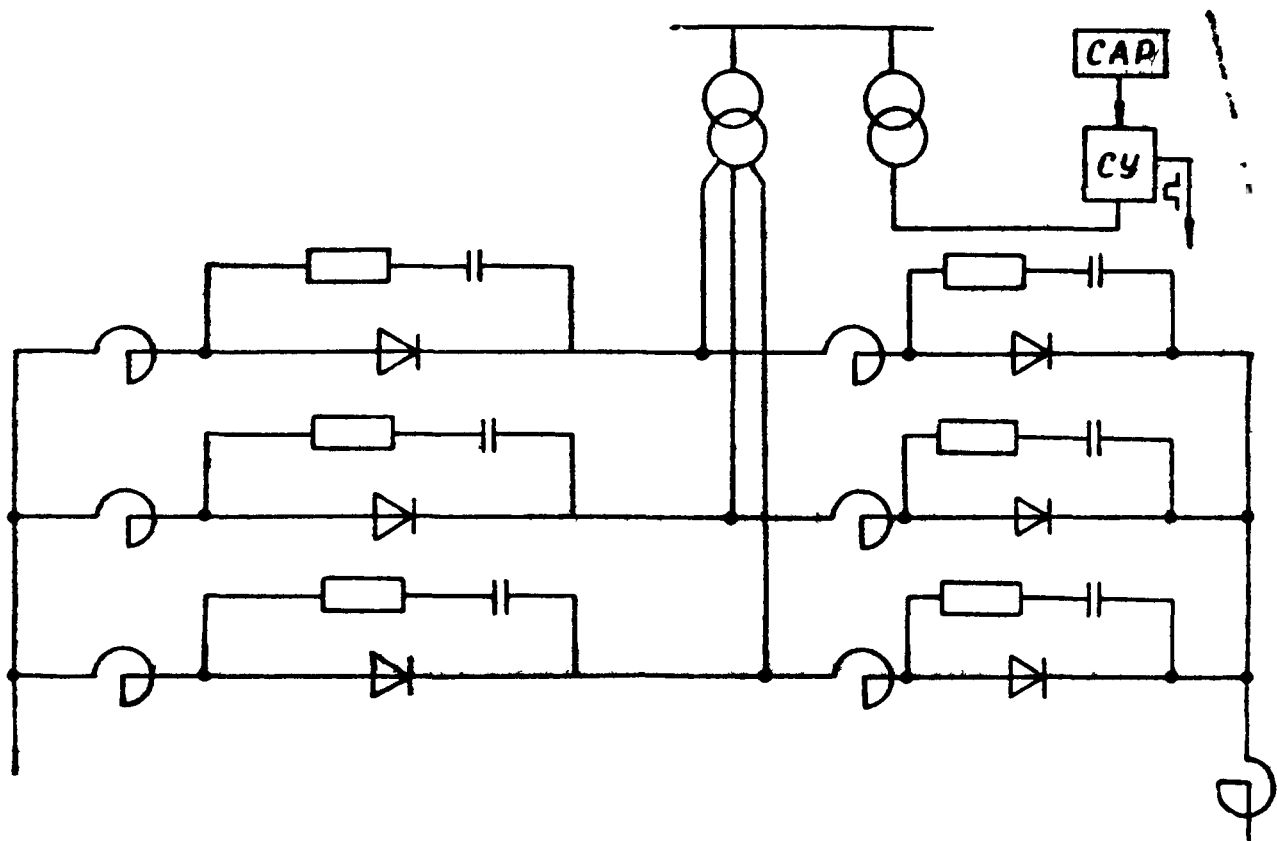
Р и с. 4.1. Схема замещения передачи постоянного тока

Основное уравнение линии постоянного тока следующее:

$$U_{d1} = U_{d2} + I_d R_d, \tag{4.3}$$

где $R_d = R_0 l$.

Основным объектом ППТ является преобразовательная подстанция (ПП), а ее основным агрегатом — вентильный мост.

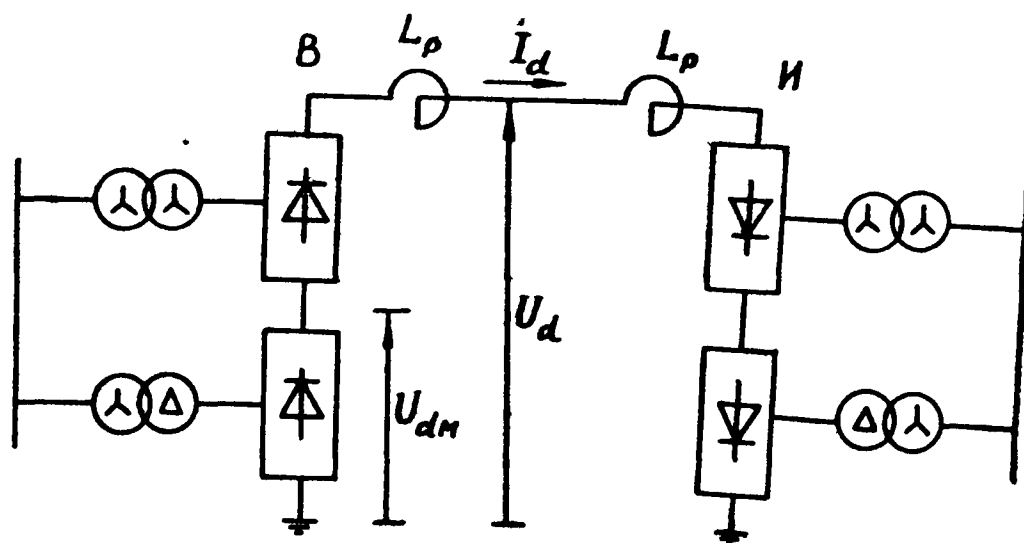


Р и с. 4.2. Мостовая схема преобразования передачи постоянного тока

Для ППТ и ВПТ используются шести- и двенадцатиполюсные мостовые схемы, позволяющие уменьшить пульсации тока при выпрямлении. Один из примеров приведен на рис. 4.2. В схеме в

каждое плечо моста включено по одному вентилю. Высоковольтный тиристорный вентиль представляет собой последовательно-параллельное соединение тиристорov, их включение происходит одновременно.

Управление мостом осуществляется от системы управления (СУ), генерирующей управляющие импульсы. В каждое плечо моста последовательно с вентилями включен анодный реактор, демпфирующий высокочастотные колебания. Его индуктивность мала и может не учитываться в эквивалентной схеме моста.



Р и с. 4.3. Схема униполярной передачи постоянного тока

В полюс моста включен реактор с большой индуктивностью, сглаживающий пульсации выпрямленного тока.

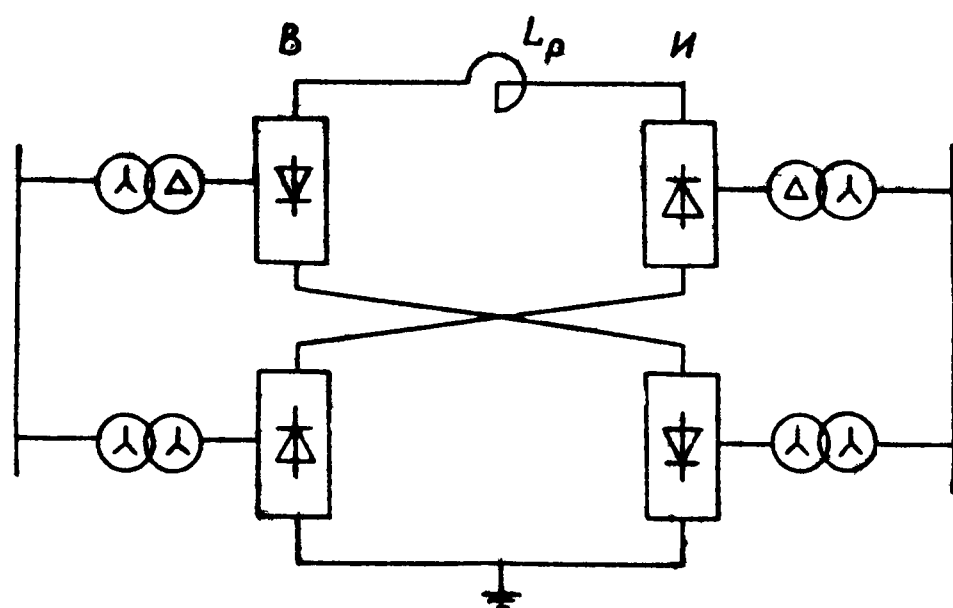
Параллельно вентилям включаются демпфирующие цепочки, состоящие из последовательно включенных резистора и емкости. Они служат подавлению высокочастотных колебаний, возникающих при работе вентилях из-за наличия собственных емкостей оборудования.

Обмотки трансформатора соединяются по схеме Y/Δ -11 или Y/Y -12. Трансформаторы соседних мостов имеют разные группы. Обмотка трансформатора, подключенная к питающей сети, называется сетевой, а подключенная к преобразователю — вентильной. Группа вентилях, подключенная анодами к шине-полюсу, называется анодной группой, а подключенная к полюсу катодами — катодной.

Наибольшие значения параметров вентилях, достигнутые конструкторами, характеризуются напряжением 250—300 кВ и мощностью 800 МВт. Увеличение напряжения и мощности ППТ достигается последовательным соединением отдельных мостов. Как правило, между полюсами линий включают не более четырех мостов. Увеличения мощности можно также достичь включением мостов параллельно.

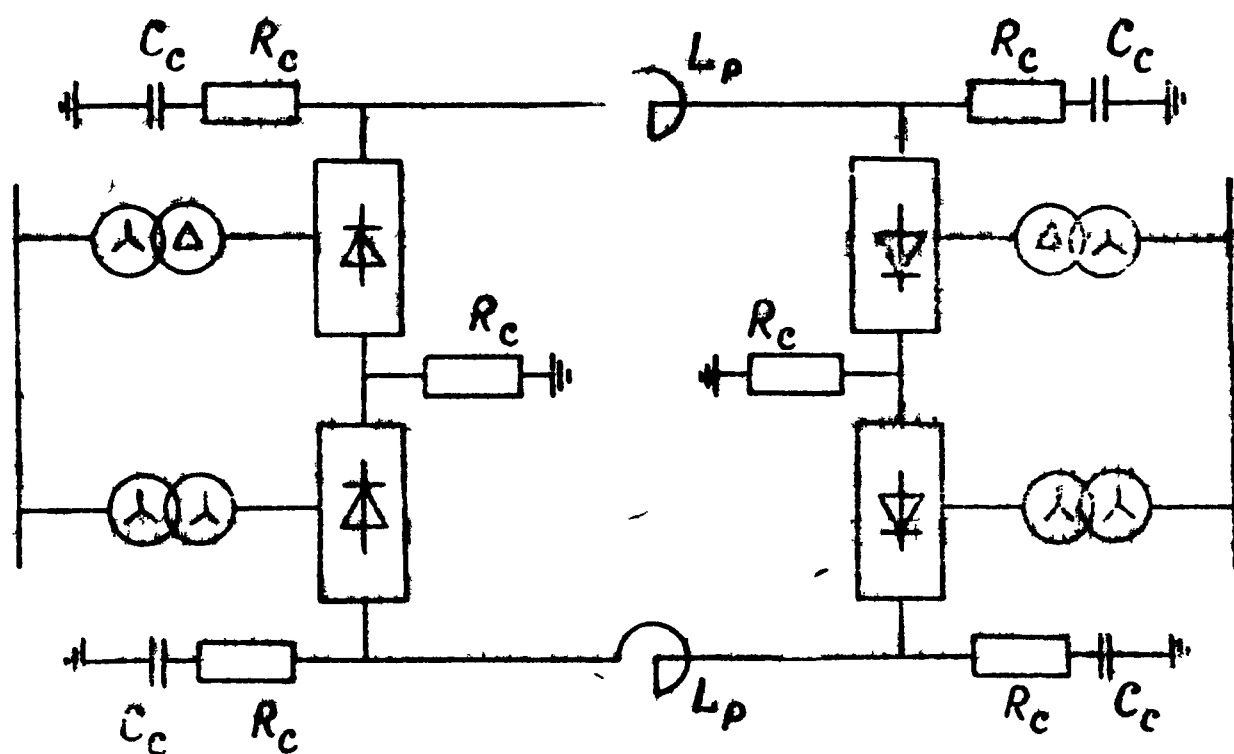
Рассмотрим некоторые принципиальные схемы ППТ (ВПТ).

В униполярных ППТ заземлен один из полюсов и линия имеет лишь один провод, изолированный от земли. Второй провод заземлен с двух сторон линии. Схема такой передачи показана



Р и с. 4.4. Схема униполярной вставки постоянного тока

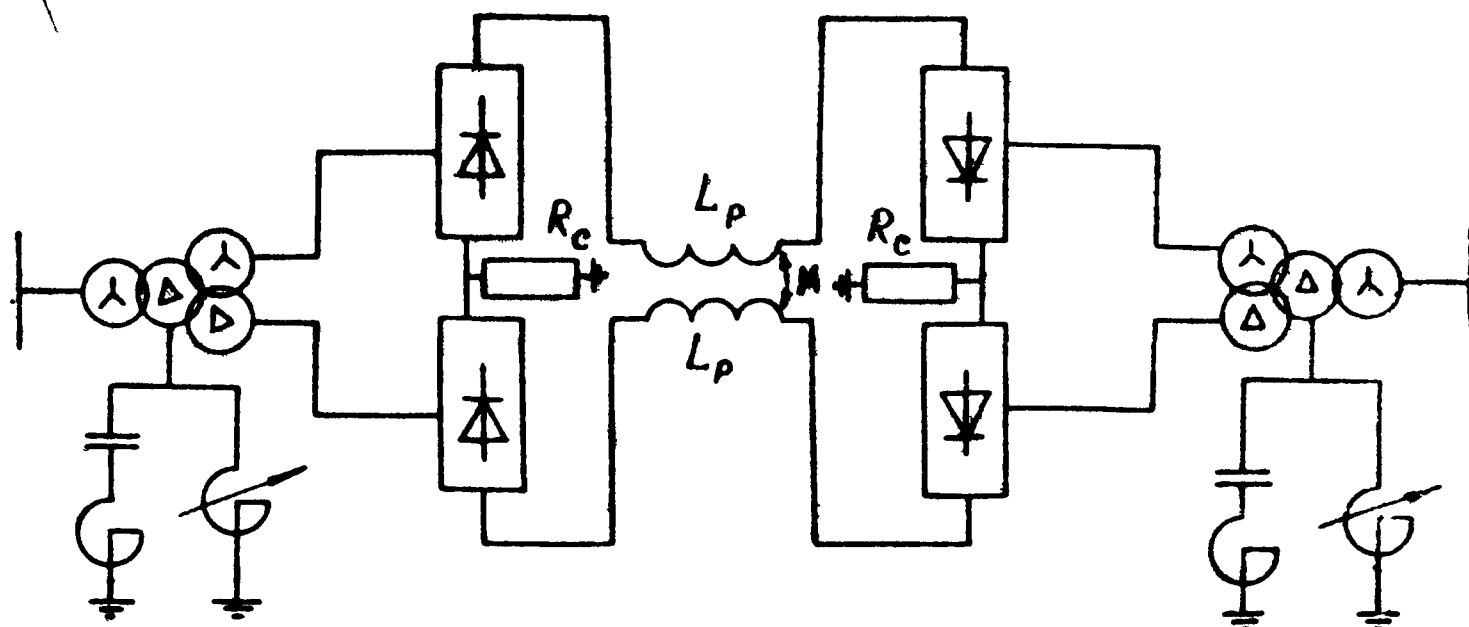
на рис. 4.3. Увеличение напряжения и мощности передачи достигается включением последовательно двух мостов, верхние преобразовательные мосты находятся под двойным выпрямленным напряжением.



Р и с. 4.5. Схема биполярной вставки постоянного тока

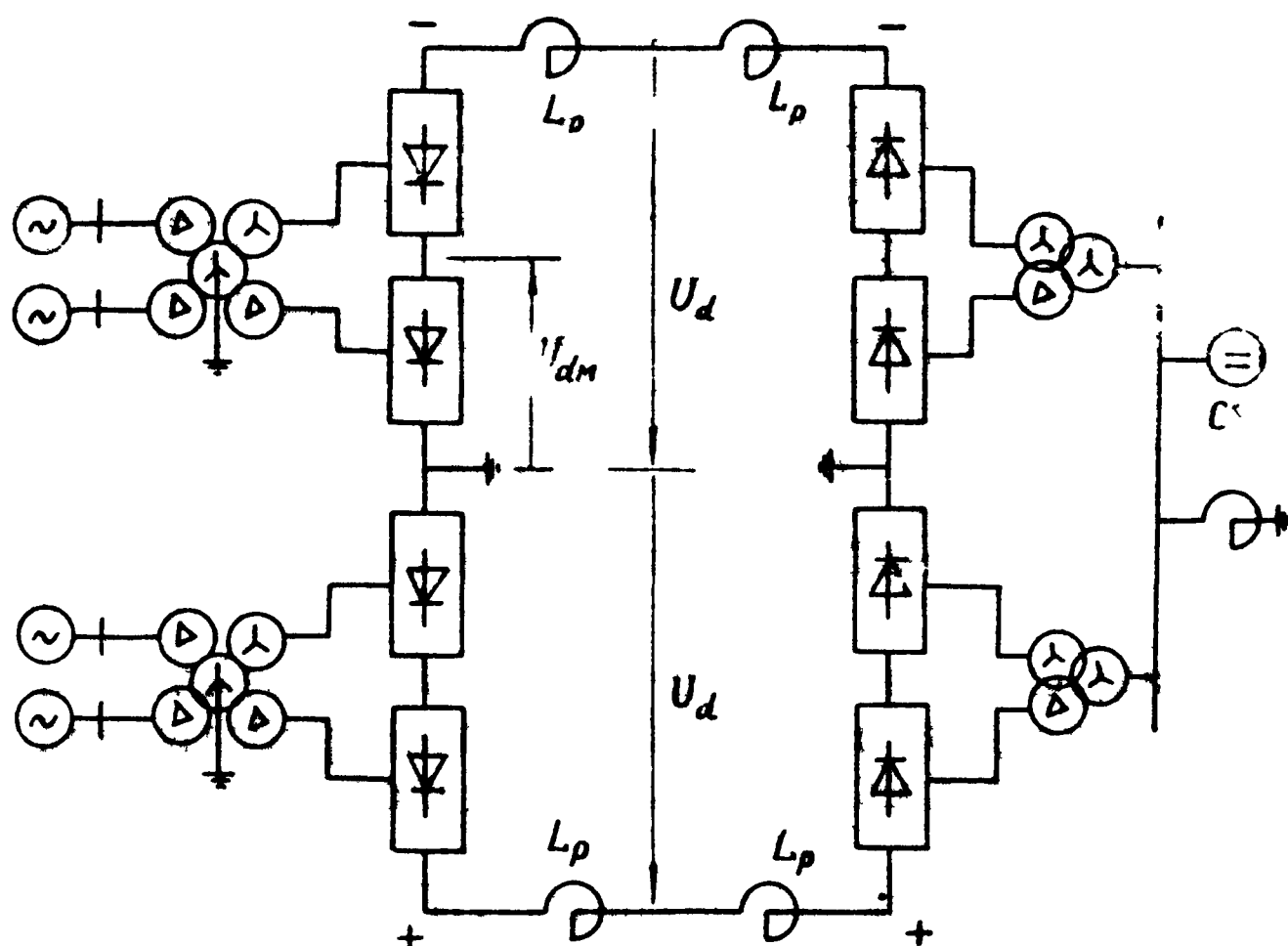
В схеме рис. 4.4, где чередуются выпрямительные и инверторные мосты, максимальный потенциал полюса не превышает выпрямленного напряжения одного моста ($U_{дм}$). Такую схему можно рекомендовать для ВПТ. В этих схемах замыкание на землю в любой точке стороны постоянного тока приводит к

режиму КЗ и сопровождается значительными токами как в месте КЗ, так и в элементах оборудования.



Р и с 4 6 Схема биполярной вставки постоянного тока с магнитной связью между полуобмотками полюсов

В биполярных схемах заземлены средние точки обоих преобразователей, а полюсы изолированы. Это позволяет разделить передачу на две независимые полуцепи. Принцип выполнения

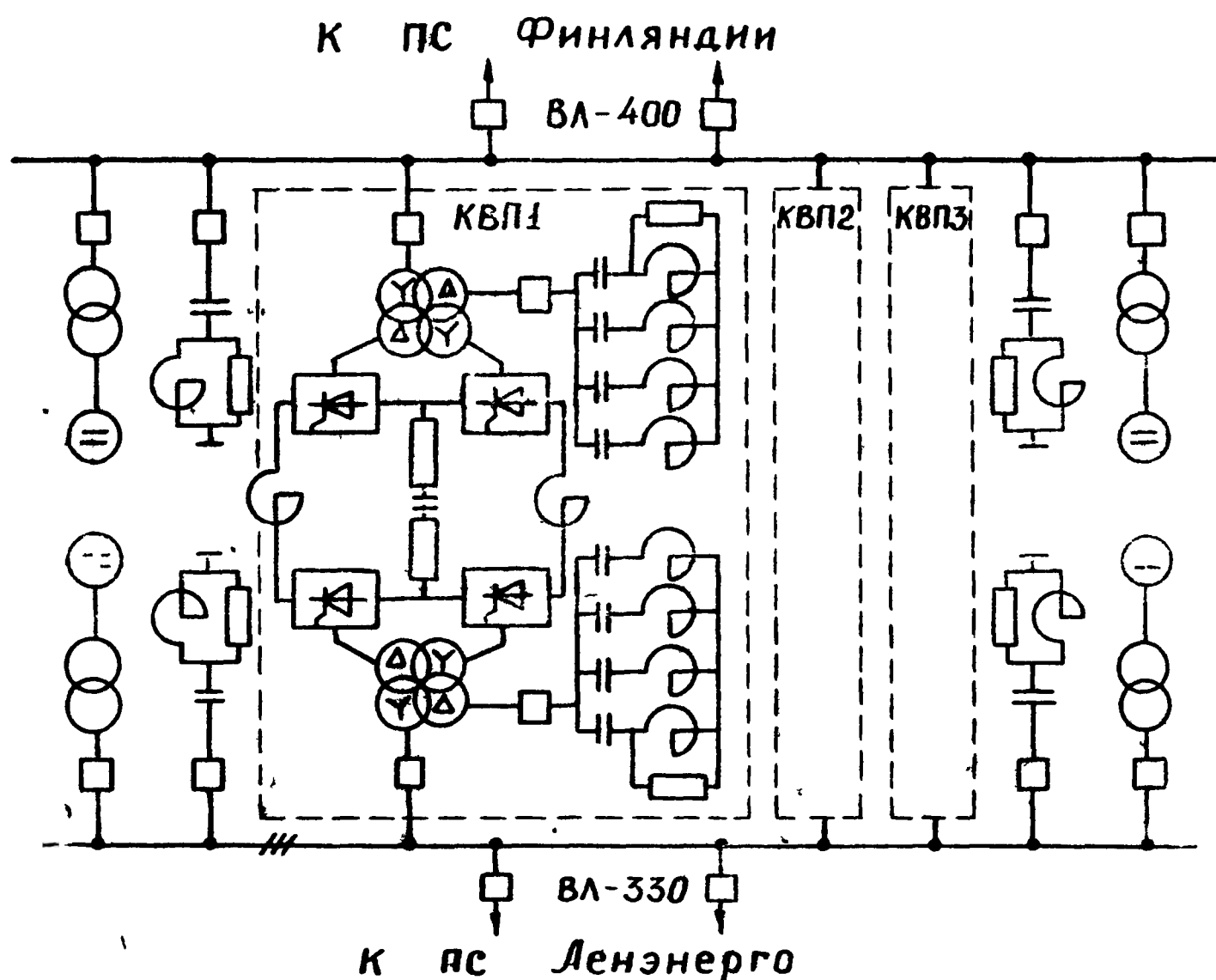


Р и с. 4,7. Схема биполярной передачи постоянного тока

биполярной схемы показан на примере ВПТ (рис. 4.5). Рабочее напряжение не превышает выпрямленного напряжения одного моста; замыкание на землю не сопровождается протеканием то-

ка КЗ, но приводит к удвоению среднего значения потенциала полюсов. Схема усложнена из-за наличия сглаживающих реакторов, резисторов в средних точках и демпфирующих и симметрирующих ($R-C$)-цепочек на полюсах преобразовательных мостов.

Применение реакторов с магнитной связью между полуобмотками, включенными в разноименные полюса, позволяет удовлетворить два противоречивых требования: увеличение индуктивности в контуре постоянного тока и снижение индуктивнос-



Р и с. 4.8. Схема Выборгской вставки постоянного тока

ти в контурах, связанных с замыканием на землю на стороне постоянного тока для облегчения условий работы при перенапряжениях. Такая схема, использующаяся для ВПТ, показана на рис. 4.6.

Область применения биполярных ППТ — передача мощностей на далекие расстояния. По таким схемам выполняются все мощные ППТ в нашей стране и за рубежом. Для увеличения напряжения передачи в каждый полюс включаются последовательно два преобразовательных моста (рис. 4.7).

При равной нагрузке полуцепей ток в земле отсутствует. При повреждении одного из полюсов передача в целом не выходит

из строя, так как вторая полупередающая продолжает работать с возвратом тока через землю. При этом мощность передачи снижается вдвое. Чтобы исключить вредное воздействие токов на подземные коммуникации, заземляющие точки обычно выносят с помощью специальных линий на десятки километров от ПП.

Для увеличения мощности передачи часто включают по несколько преобразовательных устройств параллельно. На рис. 4.8 изображена схема Выборгской ВПТ, связывающей ОЭС НОРДЭЛ стран Северной Европы и ЕЭЭС СНГ.

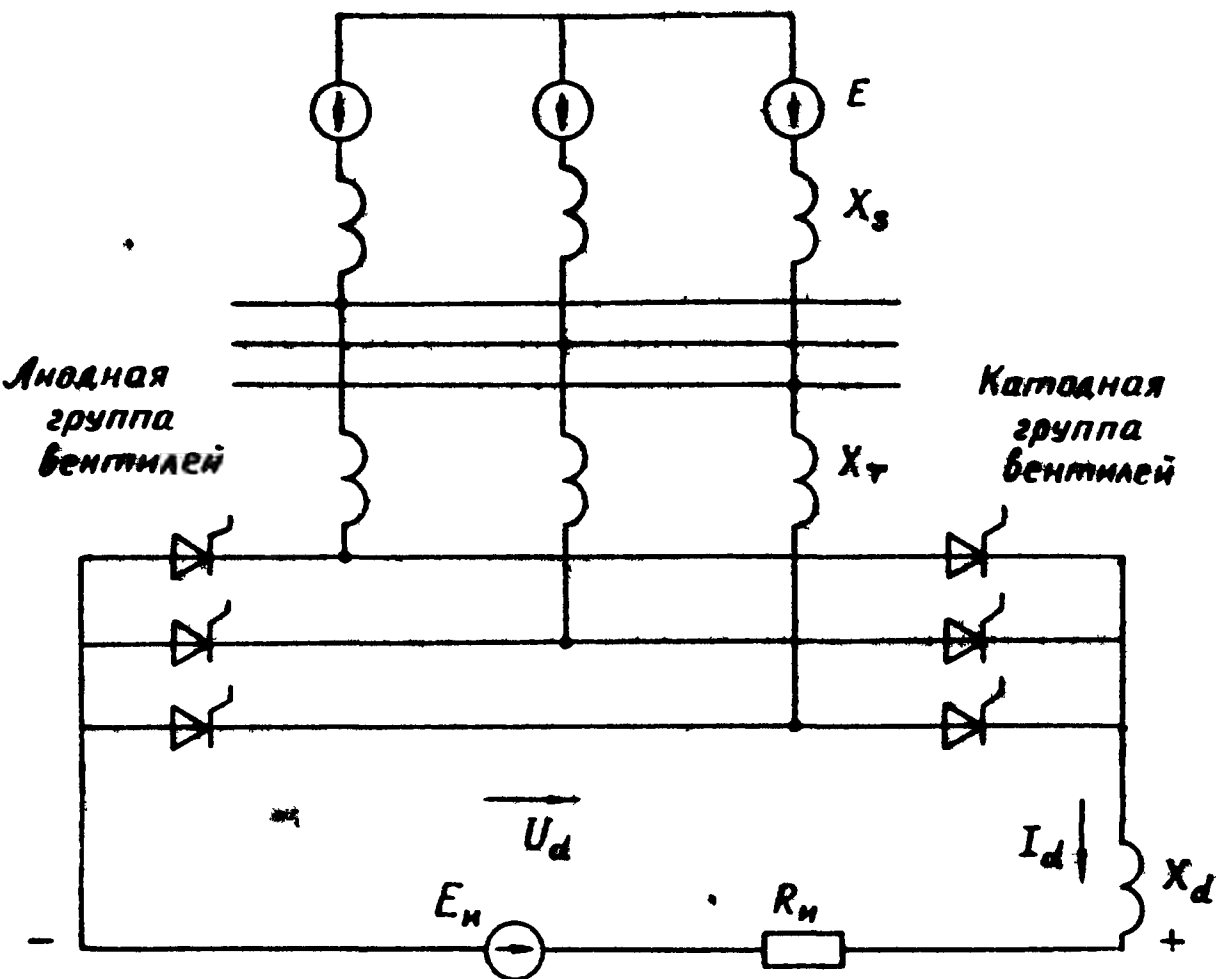
Внедрение ППТ и ВПТ длительное время сдерживалось ненадежностью преобразовательных устройств. Однако за последние годы значительно повысилась надежность работы оборудования выпрямительных и инверторных подстанций — высоковольтных тиристорных вентилей, преобразовательных трансформаторов, фильтрокомпенсирующих устройств, систем охлаждения вентилей деионизированной водой; аппаратуры управления и защиты, выполненной с применением интегральных микросхем. Коэффициент энергетической готовности ПП достигает 98—99%.

4.3. Уравнения трехфазной мостовой преобразовательной схемы

Для преобразования трехфазного переменного тока обычно используется трехфазная мостовая схема. Получим характеристики преобразователя на основе анализа электромагнитных процессов в нем. Схема замещения одностового выпрямителя приведена на рис. 4.9. Трехфазная симметричная система синусоидальных ЭДС приложена за эквивалентным сопротивлением системы X_s . Трансформатор преобразователя замещается сопротивлением рассеяния X_T . В схему замещения включено также сопротивление X_d сглаживающего реактора. Активными сопротивлениями и емкостями ввиду их малости можно пренебречь.

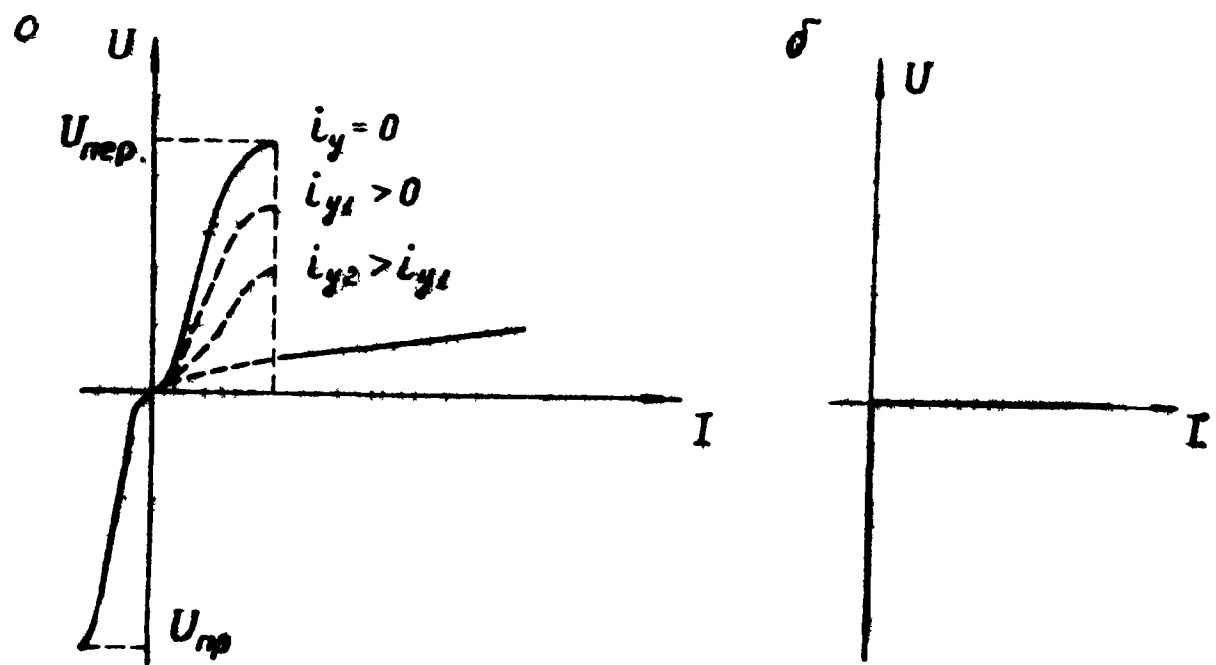
Рассмотрим характеристику отдельного тиристора, входящего в схему преобразователя. Вольт-амперная характеристика показана на рис. 4.10. При подаче на тиристор от внешнего источника положительного напряжения («плюс» на анод и «минус» на катод) и отсутствии тока управления ($i_y = 0$) тиристор будет оставаться закрытым до тех пор, пока напряжение не достигнет величины напряжения переключения $U_{пер}$. Ток при этом будет незначительным, практически равным нулю. При напряжении, большем чем $U_{пер}$, тиристор откроется и скачкообразно перейдет в проводящее состояние. Напряжение на нем резко снизится (почти до нуля), а ток возрастет. Если на тиристор пода-

вать управляющий ток, то $U_{пер}$ снизится и тем сильнее, чем больше будет величина управляющего тока. После открытия тири-



Р и с. 4.9. Схема замещения выпрямителя

тора он будет оставаться в этом состоянии даже при снятии управляющего тока, поэтому для его открытия достаточно им-

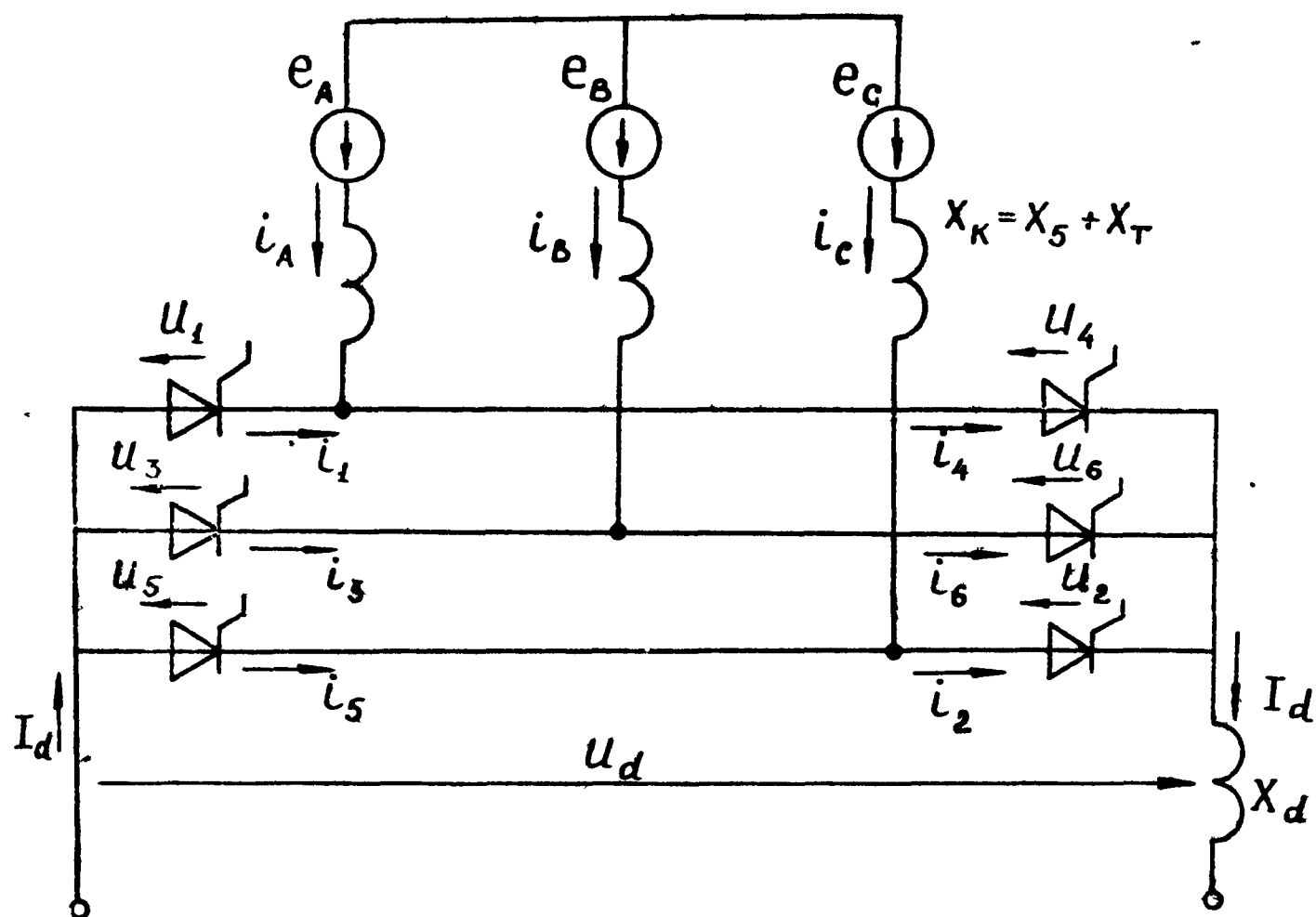


Р и с. 4.10. Вольт-амперные характеристики тиристора (а) и идеального вентиля (б)

пульса управляющего тока. Если амплитуда импульса достаточно велика, то тиристор откроется уже при незначительном напряжении $U_{пер}$.

При подаче на тиристор напряжения обратного знака он остается закрытым, и лишь когда это напряжение станет достаточно большим ($U_{пр}$), примерно равным $U_{пер}$, то тиристор будет пробит и выйдет из строя.

Пренебрегая незначительными токами утечки при закрытом тиристоре и его сопротивлением в открытом состоянии, можно представить идеальную характеристику тиристора (рис. 4.10, б).



Р и с. 4.11. Эквивалентная схема мостового преобразователя

Одновременно не будем рассматривать пульсации выпрямленного тока, полагая, что демпфирующий реактор их сглаживает.

Исходя из сказанного, рассмотрим уравнения режимов мостового преобразователя. На схеме замещения, изображенной на рис. 4.11, примем положительные направления токов совпадающими с направлением проводимости клапанов. Нумерацию напряжений клапанов примем в соответствии с очередностью их открытия. Применение первого закона Кирхгофа к схеме (см. рис. 4.11) дает уравнения:

$$\left. \begin{aligned} i_1 + i_3 + i_5 &= I_d; \\ i_2 + i_4 + i_6 &= I_d; \\ i_A = i_4 - i_1; i_B &= i_6 - i_3; i_C = i_2 - i_5. \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

Обойдя контуры u_1 , u_2 , e_A и e_C , имеем:

$$e_C - X_K \frac{di_C}{d\vartheta} - u_2 - U_d - u_1 + X_K \frac{di_A}{d\vartheta} - e_A = 0. \quad (4.5)$$

Выразив токи фаз i_A и i_C через токи вентиляй, получим:

$$e_C - e_A = X_K \frac{d}{d\vartheta} (i_1 + i_2 - i_4 - i_A) + u_1 + u_2 + u_d. \quad (4.6.1)$$

Обходя схему по другим контурам, соответствующим следующим парам вентиляй: 2—3, 3—4, ..., 6—1, получаем:

$$e_C - e_B = X_K \frac{d}{d\vartheta} (i_2 + i_3 - i_5 - i_B) + u_2 + u_3 + U_d; \quad (4.6.2)$$

$$e_A - e_B = X_K \frac{d}{d\vartheta} (i_3 + i_4 - i_5 - i_1) + u_3 + u_4 + U_d; \quad (4.6.3)$$

$$e_A - e_C = X_K \frac{d}{d\vartheta} (i_4 + i_5 - i_1 - i_2) + u_4 + u_5 + U_d; \quad (4.6.4)$$

$$e_B - e_C = X_K \frac{d}{d\vartheta} (i_5 + i_6 - i_2 - i_3) + u_5 + u_6 + U_d; \quad (4.6.5)$$

$$e_B - e_A = X_K \frac{d}{d\vartheta} (i_6 + i_1 - i_3 - i_4) + u_6 + u_1 + U_d. \quad (4.6.6)$$

В соответствии с очередностью работы вентиляй получим выражения для ЭДС в контуре выпрямления (табл. 4.1).

Т а б л и ц а 4.1

Схема действия ЭДС в контуре преобразователя

Работающие вентиляй	Действующие ЭДС	Обозначение и величина ЭДС
1—2	$e_C - e_A$	$e_1 = \sqrt{3} E_m \sin(\vartheta + 120^\circ)$
2—3	$e_C - e_B$	$e_2 = \sqrt{3} E_m \sin(\vartheta + 60^\circ)$
3—4	$e_A - e_B$	$e_3 = \sqrt{3} E_m \sin \vartheta$
4—5	$e_A - e_C$	$e_4 = \sqrt{3} E_m \sin(\vartheta - 60^\circ)$
5—6	$e_B - e_C$	$e_5 = \sqrt{3} E_m \sin(\vartheta - 120^\circ)$
6—1	$e_B - e_A$	$e_6 = \sqrt{3} E_m \sin(\vartheta - 180^\circ)$

ЭДС в контурах подчиняются уравнениям (4.6), которые являются, по существу, нелинейными, так как напряжения

$u_1, \dots, u_6$ являются нелинейными функциями тока. Однако эти кусочно-линейные функции можно аппроксимировать и решать систему (4.6) отдельно для каждого участка аппроксимации. Так как период повторения для однофазного преобразователя равен 60° , то достаточно решить уравнения (4.6) только для этого интервала.

Представляют интерес два режима работы преобразователя: режим малых токов (режим, близкий к режиму х.х) и рабочих токов.

4.4. Режим малых токов

При малой нагрузке выпрямителя, когда токи малы (менее 5% номинальных), можно пренебречь ЭДС самоиндукции в сопротивлении и система (4.6) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= u_1 + u_2 + U_d; & e_2 &= u_2 + u_3 + U_d; \\ e_3 &= u_3 + u_4 + U_d; & e_4 &= u_4 + u_5 + U_d; \\ e_5 &= u_5 + u_6 + U_d; & e_6 &= u_6 + u_1 + U_d. \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

Эти же уравнения имеем, если мощность выпрямителя много меньше мощности питающей системы, т.е. $X_K=0$.

Для анализа работы необходимо рассматривать отдельные интервалы, соответствующие определенным режимам работы вентиля. Примем за начало отсчета времени момент пересечения синусоид e_A и e_B (максимум синусоиды e_C). Тогда уравнения фазных ЭДС будут следующими:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\vartheta - 30^\circ); \\ e_B &= E_m \sin(\vartheta - 150^\circ); \\ e_C &= E_m \sin(\vartheta + 90^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

ЭДС в контурах описываются уравнениями, приведенными в табл. 4.1. Все векторы ЭДС изображены на рис. 4.12. Для принятого начала отсчета ($\vartheta=0$) работают вентили 1 и 2, их напряжения равны нулю $u_1=u_2=0$. Работает цепь $u_1-e_A-e_C-u_2$. Из (4.4) и (4.7)

$$i_1 = I_d; i_2 = I_d; i_A = -I_d; i_B = 0; i_C = I_d; e = U_d.$$

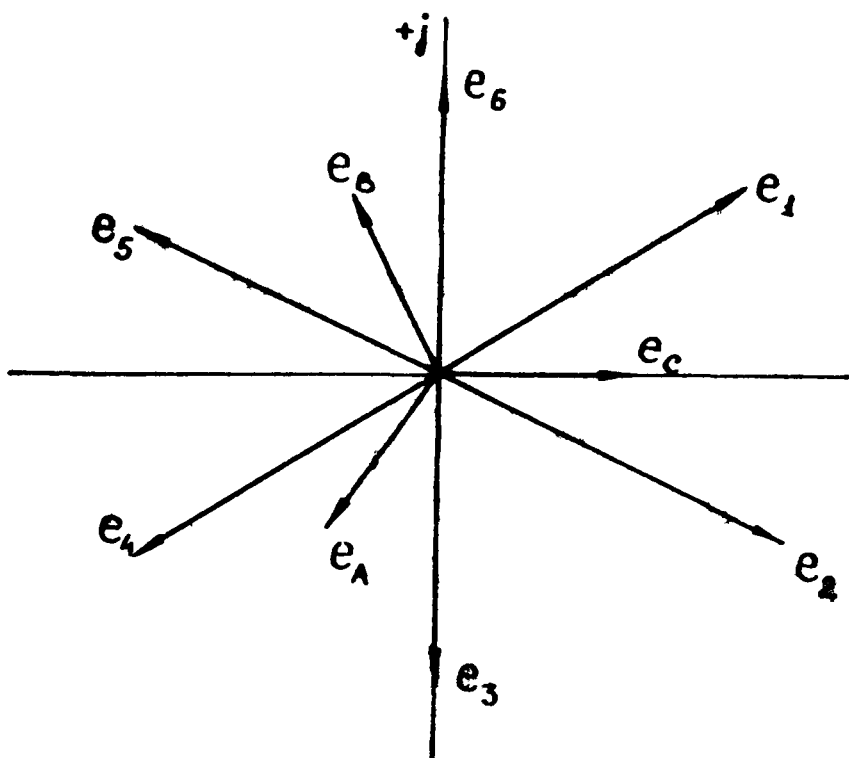
Выпрямленное напряжение — это междофазное напряжение фаз А и С контура работающих вентилях.

Из (4.7) определим напряжения на неработающих вентилях:

$$u_3 = e_2 - U_d = e_2 - e_1 = e_3 = \sqrt{3}E_m \sin \vartheta;$$

$$\begin{aligned}
u_4 &= e_4 = \sqrt{3} E_m \sin(\vartheta - 60^\circ); \\
u_5 &= e_4 = \sqrt{3} E_m \sin(\vartheta - 60^\circ); \\
u_6 &= e_5 = \sqrt{3} E_m \sin(\vartheta - 120^\circ).
\end{aligned}
\tag{4.9}$$

Таким образом, в ближайший интервал $0 < \vartheta < 60^\circ$ в работу может вступить только клапан 3, так как лишь для него $u_3 > 0$.



Р и с. 4.12. Диаграмма фазных и эквивалентных ЭДС

Если в некоторый момент ($0 < \alpha < 60^\circ$) на этот клапан подать управляющий импульс, то он откроется и произойдет коммутация тока с клапана 1 (он закроется) на клапан 3. В работе будут находиться клапаны 2 и 3. Описываемые процессы и дальнейшая работа преобразователя иллюстрируются диаграммой, изображенной на рис. 4.13. В момент $\vartheta = \alpha$, когда подается управляющий импульс на клапан 3, клапан 1 запирается, открывается цепь $u_3 - e_B - e_C - u_2$. Напряжение $u_2 = u_3 = 0$. Из (4.4) и (4.7)

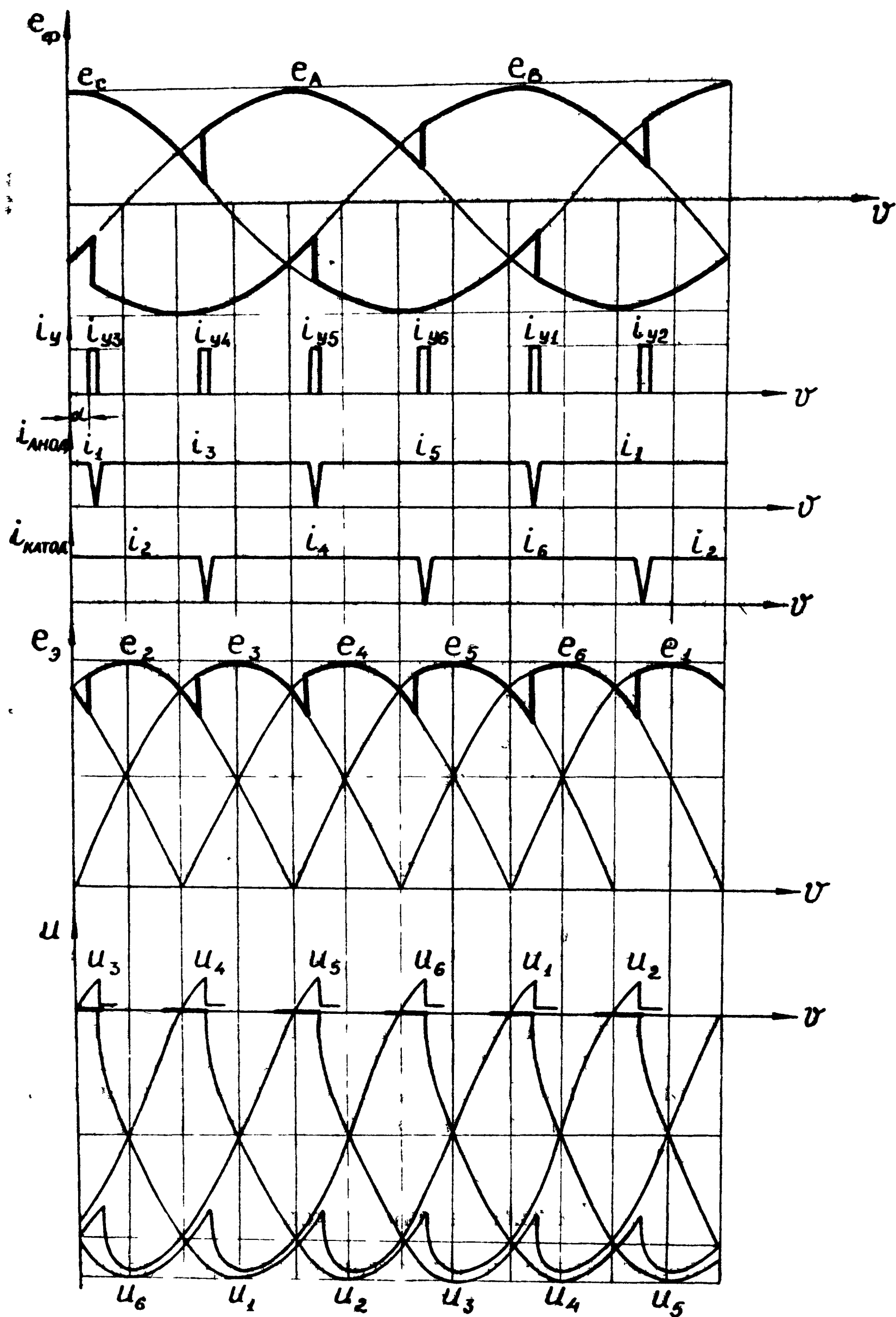
$$i_2 = I_d; i_3 = I_d; i_A = 0; i_B = -I_d; i_C = I_d; e_2 = U_d.$$

Выпрямленное напряжение — это междупазное напряжение фаз В и С. Из (4.7) определим напряжения на неработающих клапанах:

$$\left. \begin{aligned}
u_4 &= e_4 - U_d = e_3 - e_2 = e_4; u_5 = -U_d = -e_2 = e_5; \\
u_6 &= e_5; u_1 = e_1 - U_d = e_1 - e_2 = e_6.
\end{aligned} \right\} \tag{4.10}$$

Напряжение на выходе преобразователя в момент $\vartheta = \alpha$ скачком увеличивается до значения e_2 . Уравнения (4.10) справедливы для углов $\alpha \leq \vartheta \leq \alpha + 60^\circ$, т. е. до момента, когда при появлении положительного напряжения на клапане 4 на последний будет подан управляющий импульс. Далее процесс разворачивается аналогично. Значения напряжений на клапанах приводятся в табл. 4.2.

Как видно из рис. 4.13 и табл. 4.2, в катодной группе находится в работе клапан той фазы, напряжение которой макси-



Р и с. 4.13. Графики электрических величин в режиме малых токов (ре-
жим 2)

мально, а в анодной — минимально. Выпрямленное напряжение создается междупазным напряжением тех фаз, где включены работающие вентили.

Т а б л и ц а 4 2

Изменение напряжений на вентилях в режиме малых токов (режим 2)

$\vartheta_{\min}$	$\vartheta_{\max}$	Открыты вентили	U_d	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
$-60^\circ + \alpha$	α	1—2	e_1	0	0	e_3	e_4	e_4	e_5
α	$60^\circ + \alpha$	2—3	e_2	e_6	0	0	e_4	e_5	e_5
$60^\circ + \alpha$	$120^\circ + \alpha$	3—4	e_3	e_6	e_1	0	0	e_5	e_6
$120^\circ + \alpha$	$180^\circ + \alpha$	4—5	e_4	e_1	e_1	e_2	0	0	e_6
$180^\circ + \alpha$	$240^\circ + \alpha$	5—6	e_5	e_1	e_2	e_2	e_3	0	0
$240^\circ + \alpha$	$-60^\circ + \alpha$	6—1	e_6	0	e_2	e_3	e_3	e_4	0

Как видно из рис. 4.13, даже при малых значениях угла зажигания α существует заметная пульсация выпрямленного напряжения. Чем больше α , тем ниже эффективное значение U_d . Найдем его среднее значение:

$$U_d = \frac{1}{T} \left(\int_0^\alpha e_1 d\vartheta + \int_\alpha^{60^\circ} e_2 d\vartheta \right),$$

где T — период повторения U_d , соответствующий углу 60° . Отсюда

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha. \tag{4.11}$$

Из (4.11) видно, что выпрямленное напряжение не зависит от рабочего тока и внешняя характеристика преобразователя $U_d = f(I_d)$ параллельна оси абсцисс. Рассмотренный режим носит название «Режим 2», так как в любой момент времени в работе находятся два вентили.

4.5. Режим рабочих токов

При значительных токах в индуктивностях фаз запасается существенная энергия и коммутация тока между вентильями не происходит мгновенно. При переключениях токи фаз изменяются поэтому не скачком, а с некоторой постоянной времени. Рас-

смотрим процесс коммутации в той же системе отсчета, которая была принята в п. 4.4.

Для углов $0 \leq \vartheta \leq \alpha$ можно считать, что переходный процесс, вызванный предыдущей коммутацией в момент $\vartheta = -60^\circ + \alpha$, закончился. Тогда напряжение на вентилях и токи изменятся так же, как показано на рис. 4.13.

В момент подачи управляющего импульса на вентиль 3 при угле α возникает двухфазное к.з. между фазами А и В. Рабочий ток вентиля 1 постепенно снижается до нуля, а вентиля 3 — возрастает до I_d . Длительность этого процесса определяется углом γ , называемым углом коммутации. В момент $\vartheta = \alpha + \gamma$ ток вентиля 1 снижается до нуля, в работе остаются вентили 2 и 3, дальнейший ход процесса вновь определяется соответствующими участками диаграммы (см. рис. 4.13 и табл. 4.2). В последующие периоды коммутации процесс повторяется аналогично, но уже с другими группами вентиляей.

Так как в одни моменты режима рабочих токов в открытом состоянии находятся два вентиля, а в другие — три, данный режим называется «Режим 2—3».

Рассмотрим процесс коммутации подробнее. Для интервала $\alpha \leq \vartheta < \alpha + \gamma$, т.е. при одновременной работе вентиляей 1, 2 и 3, из (4.4), (4.6) имеем:

$$i_1 + i_3 = I_d, \quad (4.12)$$

откуда

$$\frac{di_1}{d\vartheta} = - \frac{di_3}{d\vartheta}; \quad (4.13)$$

$$e_1 = X_k \frac{di_1}{d\vartheta} + U_{dk}; \quad (4.14)$$

$$e_2 = X_k \frac{di_3}{d\vartheta} + U_{dk}. \quad (4.15)$$

Из (4.14) и (4.15) следует, что

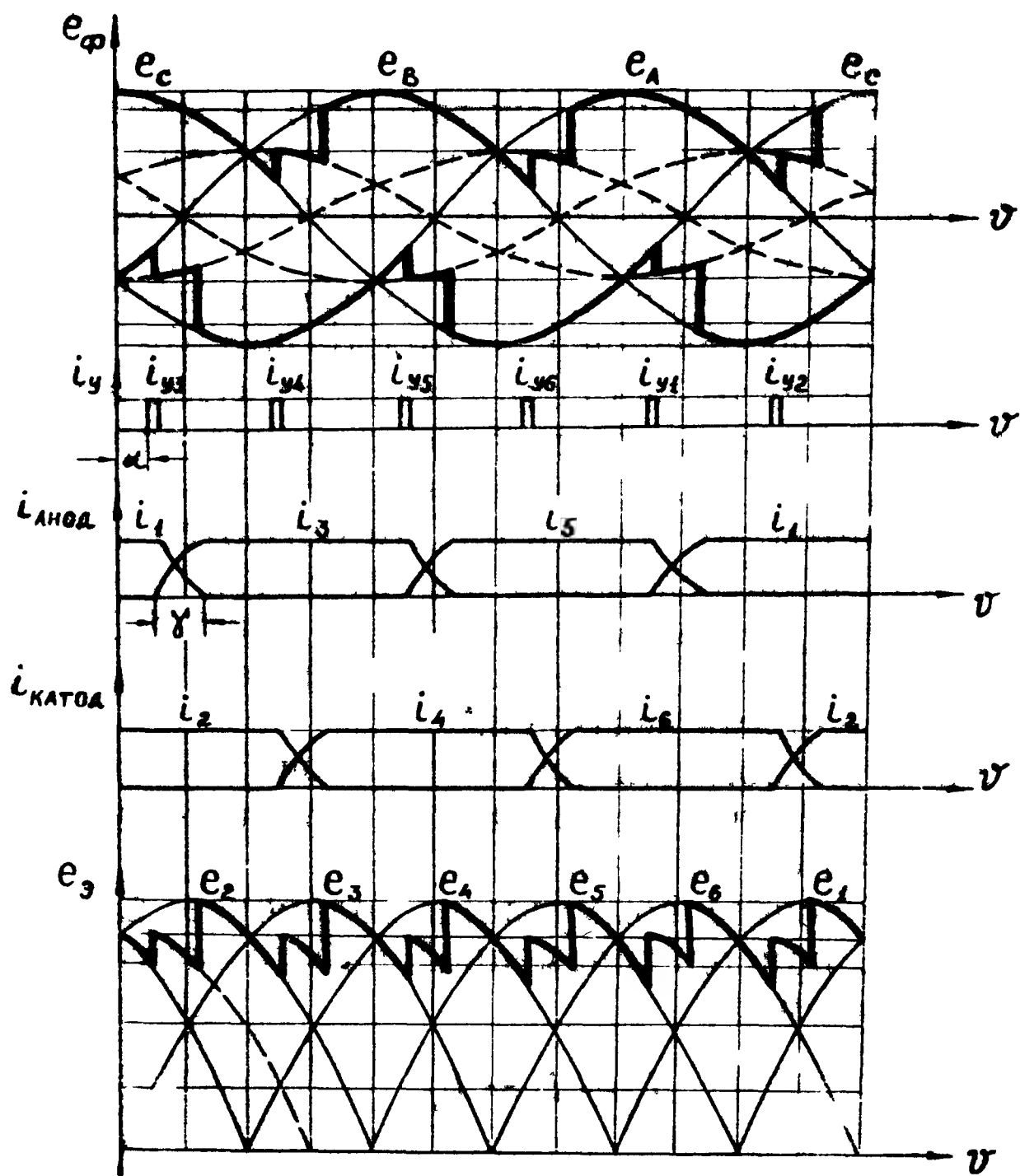
$$U_{dk} = (e_1 + e_2)/2. \quad (4.16)$$

Учитывая табл. 4.1, запишем

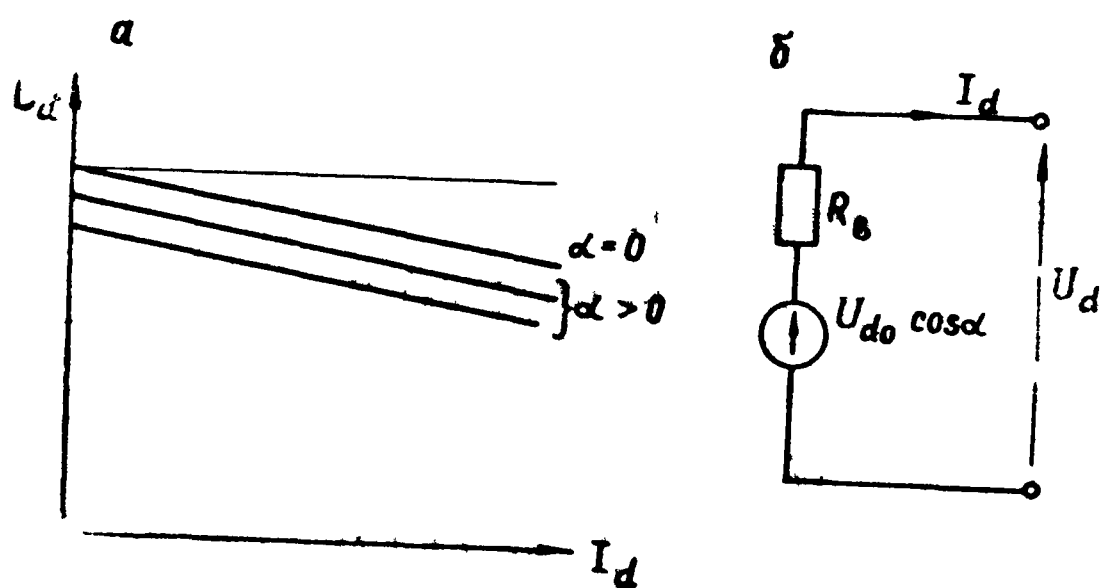
$$U_{dk} = e_C - (e_A + e_B)/2. \quad (4.17)$$

Учитывая также (4.12), (4.16) и (4.17), процессы изменения токов и ЭДС можно изобразить на рис. 4.14.

Из [2] видно, что среднее значение выпрямленного напряжения определяется выражением:



Р и с. 4.14. Графики электрических величин в режиме рабочих токов (режим 2—3)



Р и с. 4.15. Внешняя характеристика выпрямителя (а) и его схема замещения (б)

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos \alpha - \frac{3}{\pi} I_d X_k. \quad (4.18)$$

Из уравнения (4.18) определяется внешняя характеристика выпрямителя (рис. 4.15).

В соответствии с (4.18) можно представить схему замещения выпрямителя (рис. 4.15, б). Активное сопротивление в схеме замещения

$$R_B = 3X_k/\pi. \quad (4.19)$$

Из рис. 4.15 следует, что

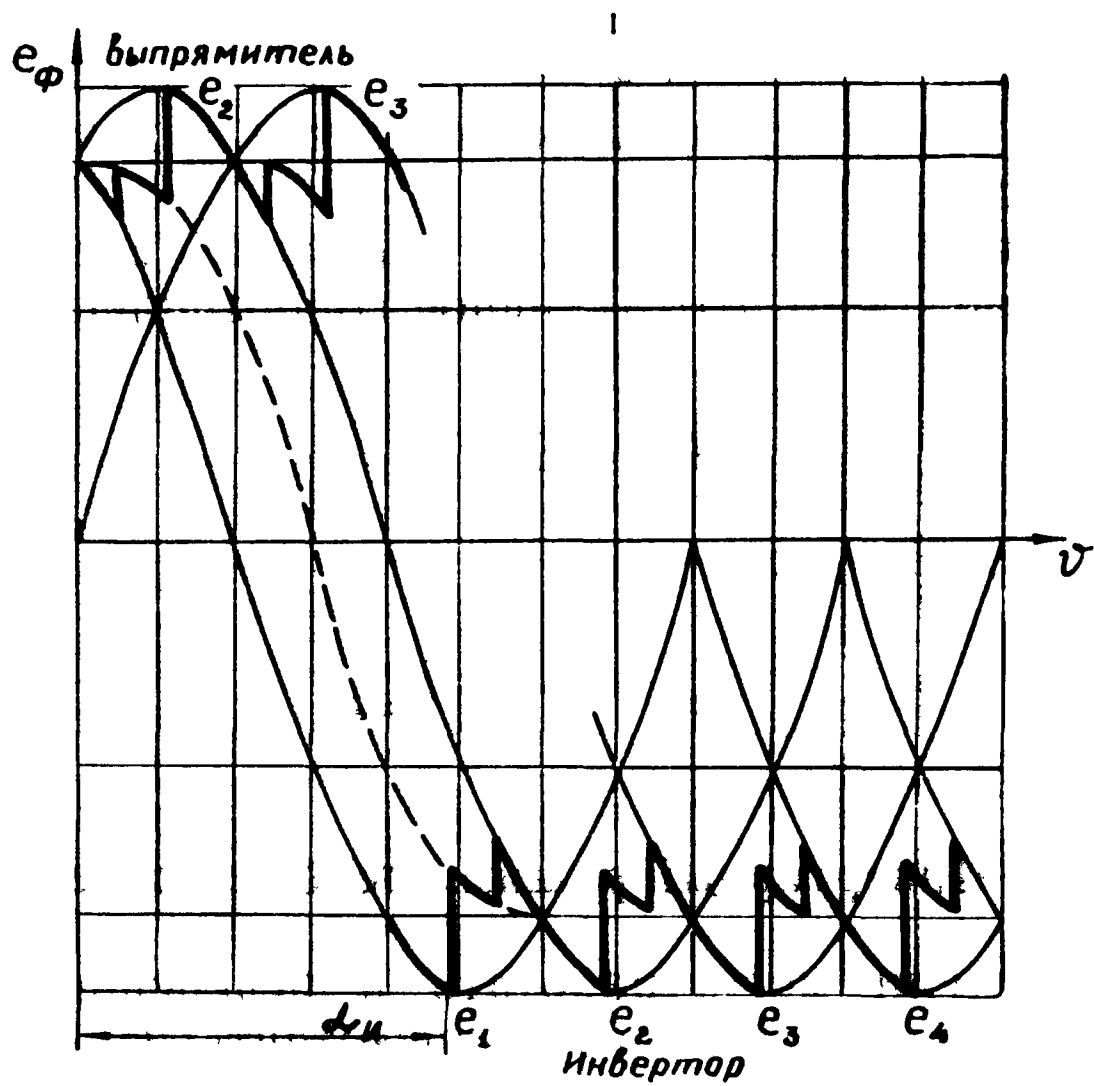
$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m.$$

4.6. Инверторный режим преобразователя

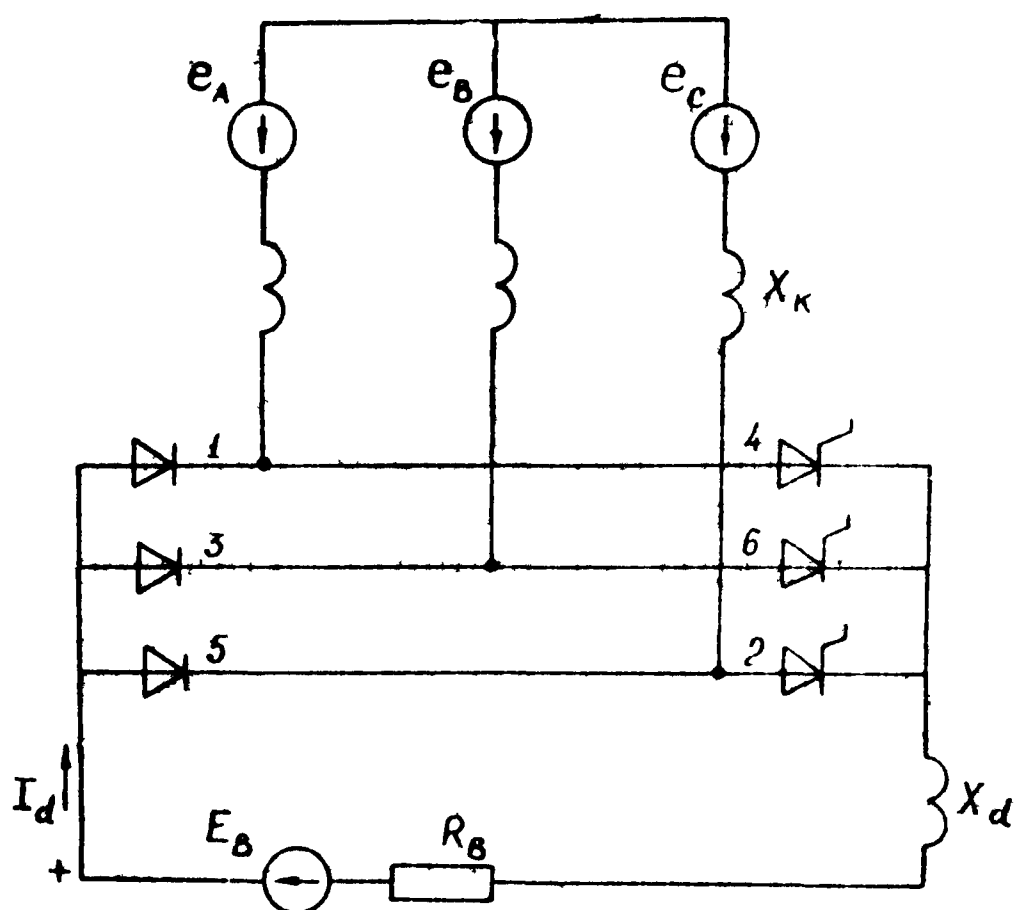
Преобразователи могут работать в реверсивных режимах. Однако реверс мощности нельзя осуществить изменением уровней напряжения по концам передачи, как в линии переменного тока, так как вентили имеют одностороннюю проводимость. Чтобы изменить направление потока мощности, надо изменить полярность напряжения преобразователя. Для этого необходимо сместить управляющие импульсы на противоположную полу-волну синусоиды напряжения сети.

Угол открытия вентиля α_i при этом должен лежать в пределах 90° — 180° . Положительное напряжение прикладывается к анодам вентиля инвертора, а отрицательное — к катодам. Процесс перевода выпрямителя в инверторный режим показан на рис. 4.16. Существо работы инвертора заключается в том, чтобы подключить к источнику постоянного напряжения поочередно такие фазы трансформатора, чтобы ток в его обмотках менял свое направление дважды за период. Целесообразно поэтому управлять коммутацией вентиля, отслеживая напряжения приемной системы. Такие инверторы носят название ведомых (ведутся сетью) в отличие от автономных, где коммутация осуществляется независимо. Эквивалентная схема однофазного инвертора изображена на рис. 4.17. На схеме e_A , e_B , e_C — эквивалентные ЭДС приемной системы, а X_k — суммарное сопротивление трансформатора и приемной системы.

Уравнения преобразователя (4.4), (4.6) сохраняют свою силу и для инвертора. Необходимо только отметить, что знак у



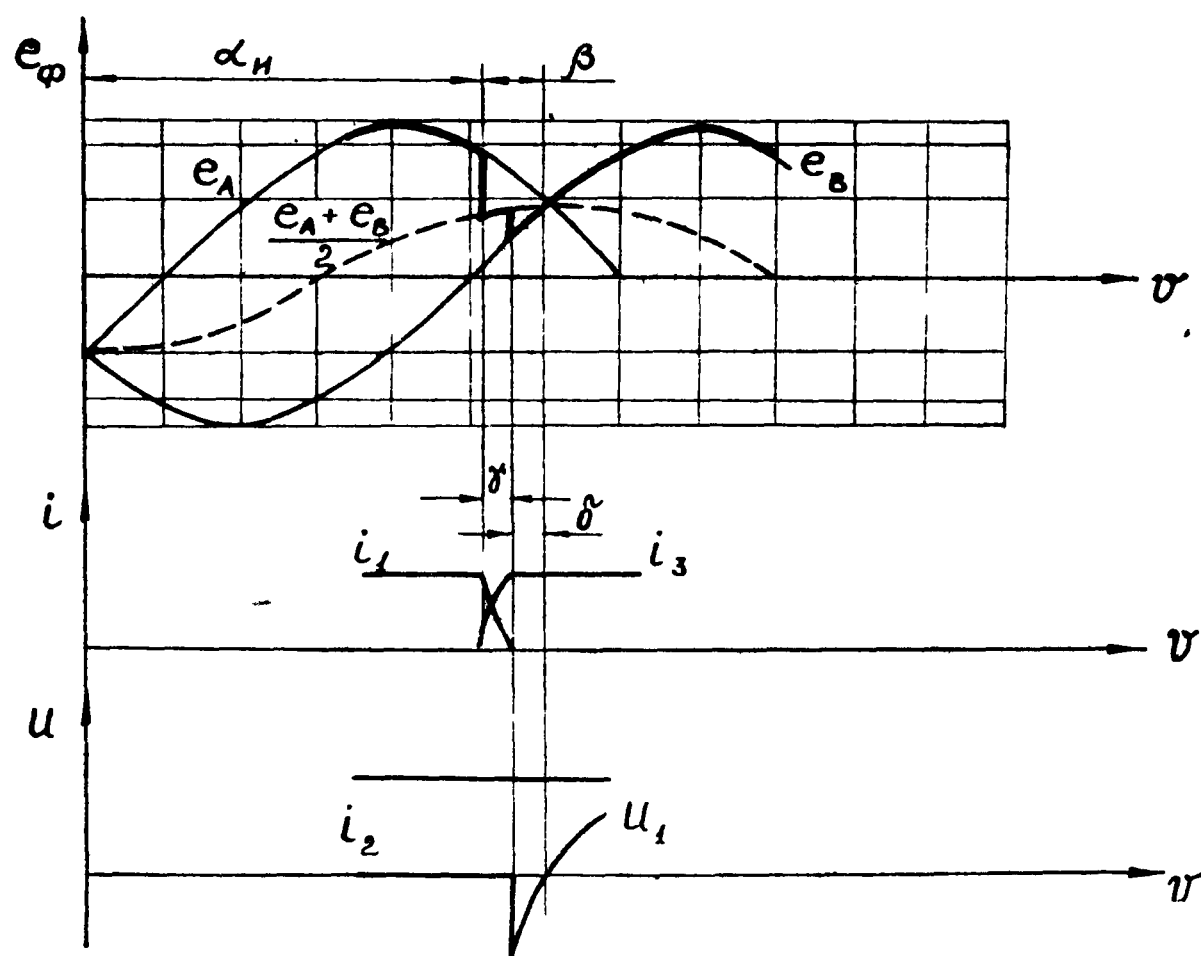
Р и с. 4 16. Перевод выпрямителя в инверторный режим



Р и с 4 17 Эквивалентная схема инвертора

напряжения U_d для инвертора при тех же углах фазных ЭДС противоположен по сравнению с выпрямителем.

Анализ работы инвертора и построение кривых изменения электрических величин для инвертора выполняются так же, как это было показано в пп. 4.4 и 4.5. На рис. 4.18 показаны процес-



Р и с. 4.18. Показатели процесса коммутации в инверторе

сы в инверторе для этапов перехода от работы клапанов 1—2 к работе клапанов 2—3.

При работе клапанов 1—2 ($\vartheta < 180^\circ$) имеем соотношения:

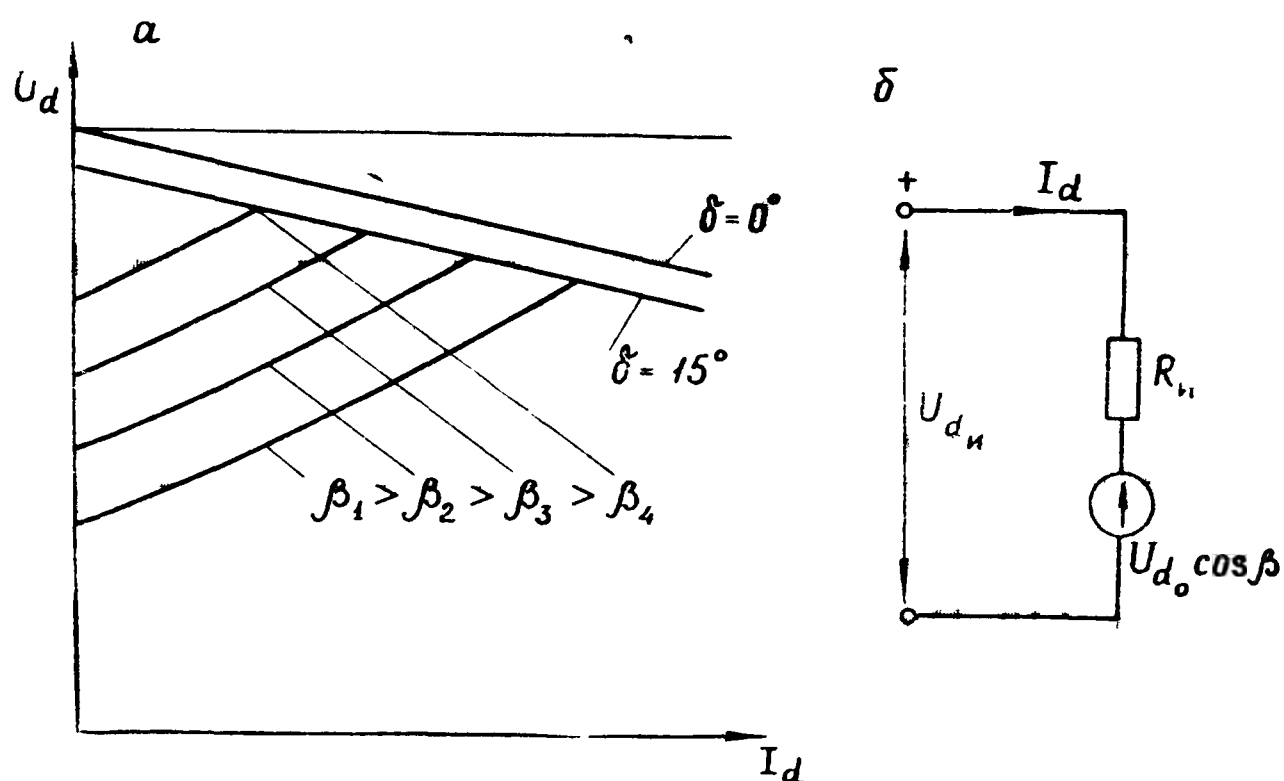
$$\left. \begin{aligned} e_1 &= U_d = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + 120^\circ), & e_2 &= u_2 + U_d; \\ e_3 &= u_3 + u_4 + U_d, & e_4 &= u_4 + u_5 + U_d; \\ e_5 &= u_5 + u_6 + U_d, & e_6 &= u_6 + U_d. \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

В отличие от выпрямителя $U_d < 0$, т. е. инвертор развивает противоЭДС. В это время на клапане 3 напряжение равно $u_3 = e_3 = \sqrt{3}E_m \sin \vartheta > 0$, он готов к работе.

Если в момент α_n (см. рис. 4.18) на клапан 3 подать управляющий импульс, он откроется и начнется коммутация тока с клапана 1 на клапан 3. Длительность процесса коммутации определяется углом коммутации γ . Так же, как и для выпрямителя, на время коммутации фазная ЭДС фаз А и В определяется их средним значением. То же относится и к эквивалентной ЭДС, которая равна среднему значению e_1 и e_2 .

Чтобы коммутирующий ток сохранил то же направление, что и в выпрямителе, т. е. был направлен встречно току вентиля 1 и совпадал с током вентиля 3, вступающего в работу, необходимо, чтобы управляющий импульс i_{y3} был подан в зоне, где $e_A > e_B$, ЭДС предыдущей фазы больше, чем ЭДС очередной фазы (при $\alpha_{и} < 180^\circ$).

Момент открытия вентиля инвертора удобнее отсчитывать от точки пересечения фазных ЭДС не в сторону отставания (угол $\alpha_{и}$), а в сторону опережения (угол β). Угол $\beta = 180^\circ - \alpha_{и}$ и называется углом опережения. Угол $\delta = \beta - \gamma$ носит название «угол погасания». Так как $u_1 = -\sqrt{3} E_m \sin \vartheta$, то спустя угол δ



Р и с. 4.19. Внешняя характеристика инвертора (а) и его схема замещения (б)

после окончания процесса перехода от режима 1—2 к режиму 2—3 напряжение на вентиле 1 перейдет через нуль (см. рис. 4.18). Так как напряжение на вентиле 1 снова становится положительным, возникает опасность, что он может самопроизвольно открыться от того, что процесс деионизации в нем после его закрытия в момент $\vartheta = 180^\circ - \delta$ не успеет закончиться. Чтобы этого не случилось, требуется выполнение условия $\delta > \delta_0$, где δ_0 — угол, соответствующий времени рассасывания (выключения) тиристора, обычно равный 5—6°. С учетом разброса управляющих импульсов целесообразно выполнить условие:

$$\delta > 15 - 18^\circ.$$

Внешняя характеристика инвертора определяется зависимостью (4.21), аналогичной (4.18):

$$U_{dИ} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos \beta + \frac{3}{\pi} I_d X_k. \quad (4.21)$$

Отличие в знаке определяется различием полярностей выводов преобразователей

$$U_{dВ} = -U_{dИ}.$$

Графически внешняя характеристика инвертора приведена на рис. 4.19, а. Здесь начальное значение напряжения U_d определяется углом опережения β , а конечное зависит от угла погасания. На рис. 4.19, а показаны два конечных значения внешних характеристик: для идеального ($\delta=0$) и реального ($\delta=15^\circ$) вентилей. На рис. 4.19, б приведена эквивалентная схема замещения инвертора. Изображенное на ней эквивалентное активное сопротивление преобразователя

$$R_{И} = \frac{3}{\pi} X_k.$$

Оно определяет наклон внешней характеристики.

4.7. Регулирование работы передач постоянного тока

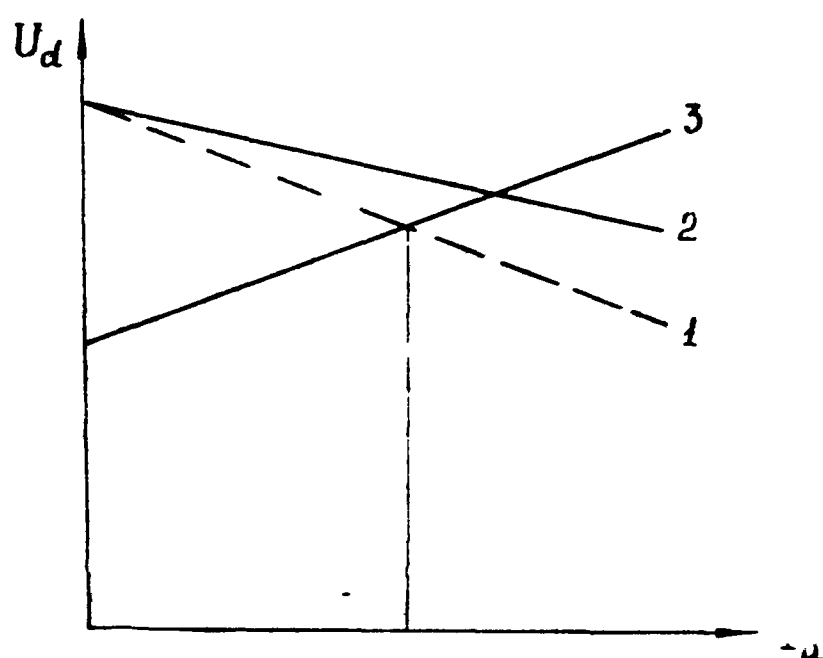
Совместная работа выпрямителя и инвертора характеризуется пересечением их внешних характеристик. При рассмотрении ППТ необходимо учесть также характеристику линии электропередачи, т. е. падение напряжения в активном сопротивлении ее схемы замещения. На рис. 4.20 приведены характеристики выпрямителя (с учетом линии) и инвертора. Для выпрямителя уравнение внешней характеристики с учетом линии можно записать в виде

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos \alpha - \left(\frac{3}{\pi} X_{к, в} + R_{л} \right) I_d. \quad (4.22)$$

Меняя углы зажигания α и опережения β , можно задавать любой режим рабочего тока, а следовательно, и мощности ППТ.

Однако следует отметить, что на инверторе обычно устанавливается регулятор, который в целях повышения его экономических показателей поддерживает неизменным угол погасания δ . При увеличении тока нагрузки этот регулятор, называемый регулятором угла погасания (РУП), увеличивает угол опережения β . Если бы РУП не было, то с увеличением тока нагрузки угол погасания δ снижался бы из-за роста угла коммутации γ (см. рис. 4.19). Из рис. 4.19 видно также, что при отсут-

вии РУП и достижении некоторого заданного угла погасания дальнейший рост нагрузки невозможен.*

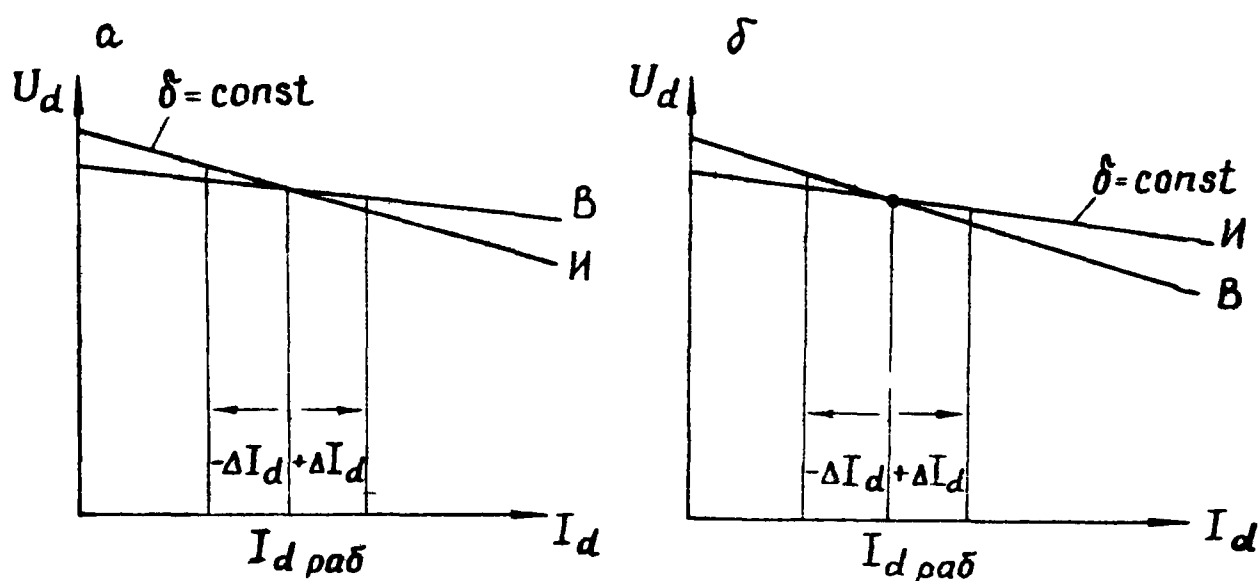


Р и с. 4.20. Иллюстрация совместной работы выпрямителя и инвертора
1 — внешняя характеристика выпрямителя с учетом линии, 2 — то же, без учета линии, 3 — внешняя характеристика инвертора

Можно показать [2], что при регулировании угла опережения уравнение внешней характеристики инвертора выглядит следующим образом:

$$U_{dИ} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos \delta - \frac{3}{\pi} I_d X_{к.и}, \quad (4.23)$$

т. е. характеристика имеет отрицательный статизм, как и характеристика выпрямителя.



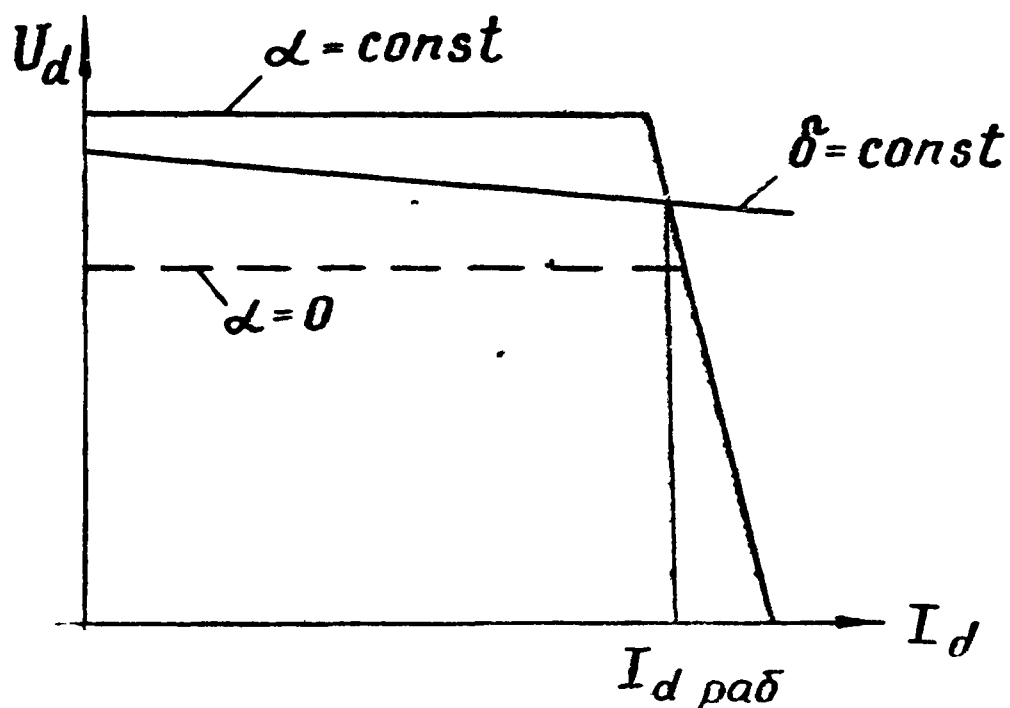
Р и с. 4.21. Совместная работа выпрямителя и инвертора с регулятором угла погасания

Наличие такой характеристики создает опасность возникновения неустойчивых режимов. Такая ситуация возникает в случае, когда наклон характеристики выпрямителя меньше наклона характеристики инвертора (рис. 4.21, а). Это возможно при условии, что

$$\frac{3}{\pi} X_{\text{к. в}} + R_{\text{л}} < \frac{3}{\pi} X_{\text{к. и}}, \quad (4.24)$$

т. е. когда мощность питающей системы больше мощности приемной.

Из рис. 4.21 видно, что нарушение равновесия за счет появления дополнительного рабочего тока $+\Delta I_d$ приведет к снижению ЭДС выпрямителя и противоЭДС инвертора, но избыточная неуравновешенная ЭДС выпрямителя приведет к дальнейшему увеличению тока в линии. В результате ППТ выйдет из



Р и с. 4.22. Совместная работа выпрямителя с РТ и инвертора с РУП

работы. Аналогично можно показать неустойчивость режима при уменьшении рабочего тока. Ток в передаче снизится до нуля.

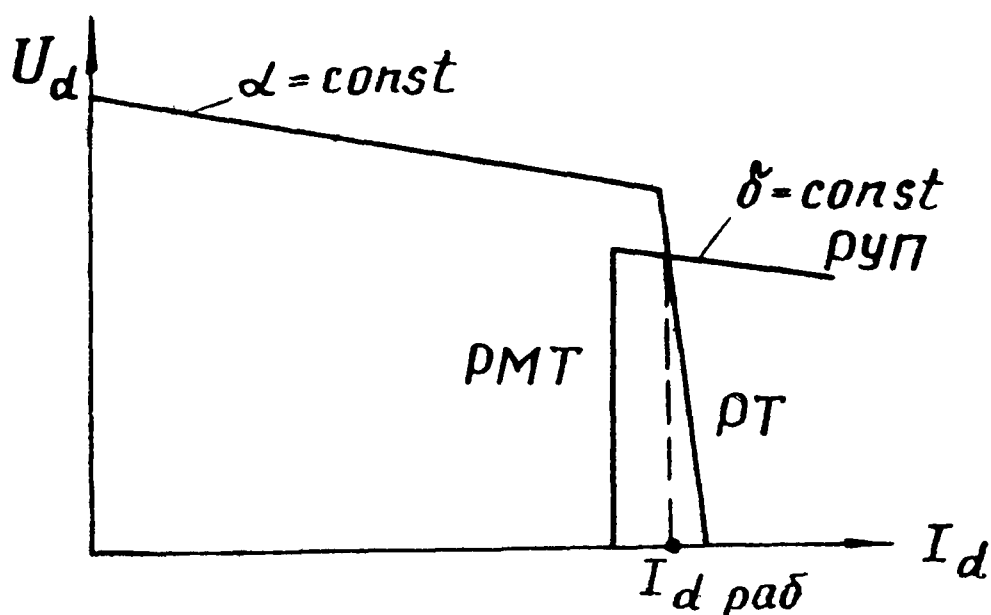
В случае, когда характеристика выпрямителя круче характеристики инвертора, схема устойчива, что следует из анализа рис. 4.21, б. При случайных отклонениях рабочего тока режим возвращается к исходному состоянию.

Устойчивость совместной работы можно также повысить путем установки на выпрямителе регулятора тока (РТ). Регулятор таким образом изменяет угол зажигания α , чтобы поддерживать ток в линии неизменным. Характеристика выпрямителя, оснащенного РТ, изображена на рис. 4.22. Пологая часть характеристики выпрямителя соответствует нерегулируемому режиму ($\alpha = \text{const}$), а падающая — режиму работы РТ на поддержание постоянного тока в линии. Начальный угол работы РТ $\alpha = 5-10^\circ$. При снижении напряжения в передающей системе регулятор уменьшает угол α вплоть до нуля. С помощью регуля-

тора тока выпрямителя работу ППТ удастся сделать устойчивой при любых соотношениях мощностей передающей и приемной систем.

При глубоких снижениях напряжения диапазона регулирования за счет действия РТ недостаточно. В этом случае в действие необходимо вводить устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) трансформаторов. Недостатком этих устройств является их медленное действие.

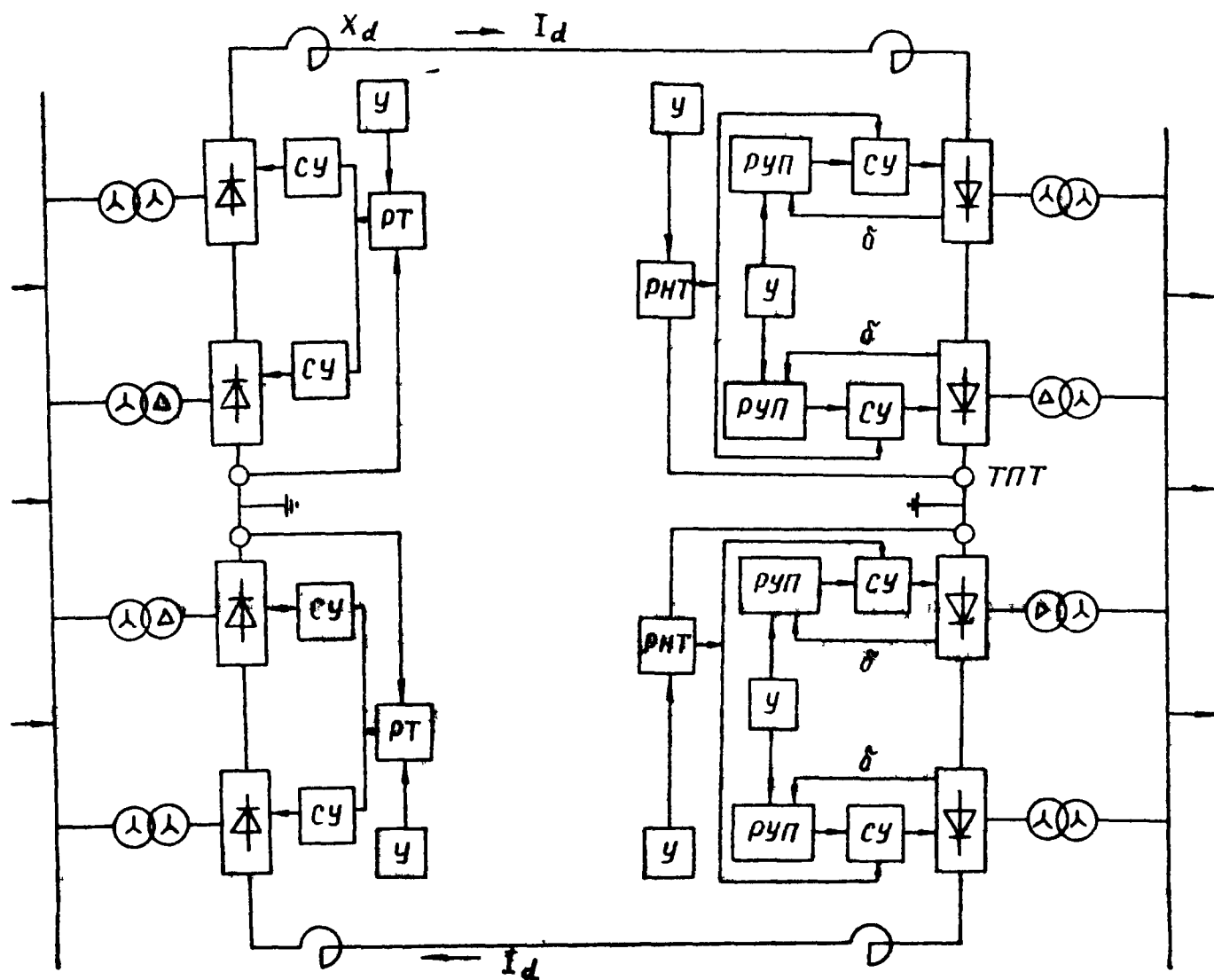
Если ЭДС выпрямителя снизится так, что его характеристика окажется ниже характеристики инвертора (см. рис. 4.22, ха-



Р и с. 4.23. Графики регулируемой совместной работы преобразователей ППТ

рактеристика при $\alpha=0$), то ток в линии упадет до нуля. Чтобы этого не случилось, одновременно со снижением ЭДС выпрямителя следует снижать и противоЭДС инвертора. Для этого на инверторе устанавливается регулятор минимального тока (РМТ). Он увеличивает угол опережения вентилей инвертора при снижении тока в линии, снижая тем самым противоЭДС, если ток в линии оказывается меньше уставки регулятора. Обычно ток уставки РМТ принимается равным 90% тока уставки РТ выпрямителя. При изменении уставки последнего автоматически по каналу связи изменяется и уставка РМТ. В результате ток в линии ограничен с двух сторон уставками регуляторов и не изменяется при нарушениях режима, даже при к. з. в линии. Изменяются лишь ЭДС выпрямителя и противоЭДС инвертора. Соответствующие характеристики приведены на рис. 4.23. Изменение тока передачи обеспечивается смещением уставки регулятора тока. Одновременно автоматически изменяется и уставка РМТ. На рис. 4.24 приведена структурная схема системы автоматического регулирования ППТ.

Благодаря использованию управляемых вентилях электропередачи постоянного тока имеют лучшие характеристики регулирования, чем электропередачи переменного тока. При этом регулирование осуществляется практически безынерционно. Кроме того, изменение мощности ППТ осуществляется за счет внутреннего регулирования, в отличие от электропередач переменного тока, передаваемую мощность которых можно изменять только за счет внешних факторов. В результате ППТ представ-



Р и с. 4.24. Структурная схема системы автоматического регулирования ППТ:

СУ — система управления вентилями; РТ — регулятор тока; У — устройство уставки; РУП — регулятор угла погасания; ТПТ — измерительный трансформатор погасания тока

ляет собой гибкое средство повышения устойчивости работы ЭЭС.

4.8. Проблемы передач постоянного тока

При эксплуатации ППТ возникают специфические трудности, преодолевать которые необходимо специальными средствами, внося определенные изменения в конструктивное их исполнение. Как правило, это приводит к заметному удорожанию электропередач. Рассмотрим только некоторые из них.

Высшие гармоники и их компенсация. Вентильный мост потребляет из сети ток несинусоидальной формы, содержащий высшие гармоники. Предположим, что углы коммутации и управления вентилях равны нулю. Тогда токи вентилях и вентильной обмотки трансформатора будут иметь прямоугольную форму с длительностью 120° . При схеме соединений трансформатора Y/Y ток сетевой обмотки будет повторять форму тока вентильной (рис. 4.25).

Так как функция тока удовлетворяет условию $f(\vartheta) = -f(\vartheta + \pi)$, то она раскладывается в ряд Фурье, содержащий только нечетные гармоники. Можно также показать [2], что ряд не со-

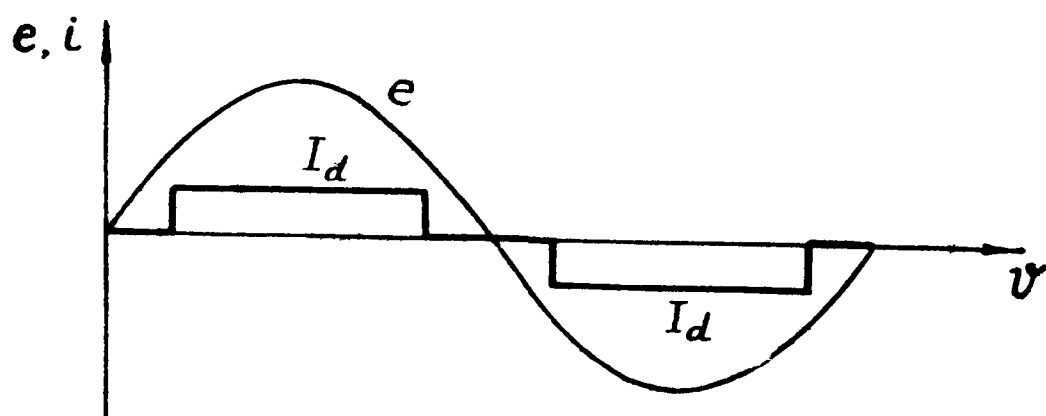


Рис. 4.25. Ток сетевой обмотки трансформатора при схеме его соединений Y/Y

держит гармоник, кратных трем, так как при соединении Y/Y нулевая последовательность отсутствует:

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\sin \vartheta - \frac{1}{5} \sin 5\vartheta + \frac{1}{7} \sin 7\vartheta - \dots \right). \quad (4.25)$$

Гармоники порядка $\vartheta = 6k + 1$ имеют прямую последовательность, а гармоники $\vartheta = 6k - 1$ — обратную.

При схеме соединений трансформатора Y/Δ форма тока вентилях также прямоугольна (то же относится к линейным токам вентильной обмотки), а токи в фазах определяются соотношениями:

$$i_A = i_{a'} - i_{b'}; \quad i_B = i_{b'} - i_{c'}; \quad i_C = i_{c'} - i_{a'}. \quad (4.26)$$

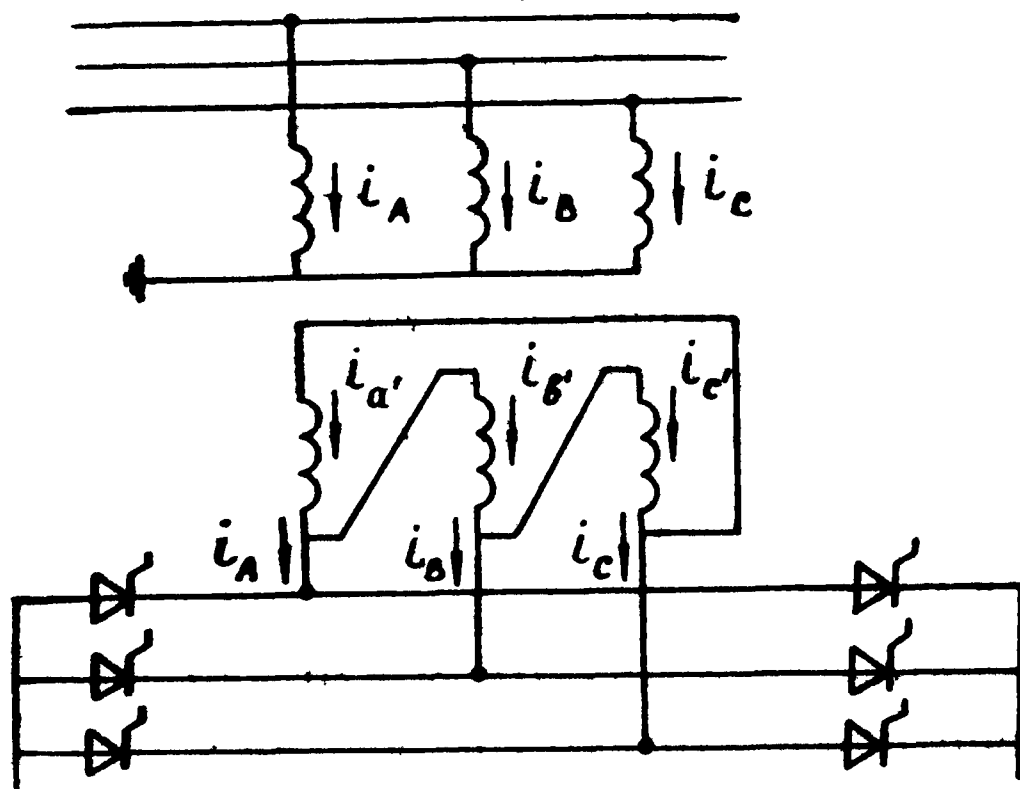
Решение этой системы следующее (рис. 4.26 и 4.27):

$$i_{a'} = \frac{1}{3} (i_A - i_C); \quad i_{b'} = \frac{1}{3} (i_B - i_A); \quad i_{c'} = \frac{1}{3} (i_C - i_B). \quad (4.27)$$

Разложение сетевого тока в ряд Фурье имеет вид:

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\sin \vartheta + \frac{1}{5} \sin 5\vartheta - \frac{1}{7} \sin 7\vartheta + \dots \right). \quad (4.28)$$

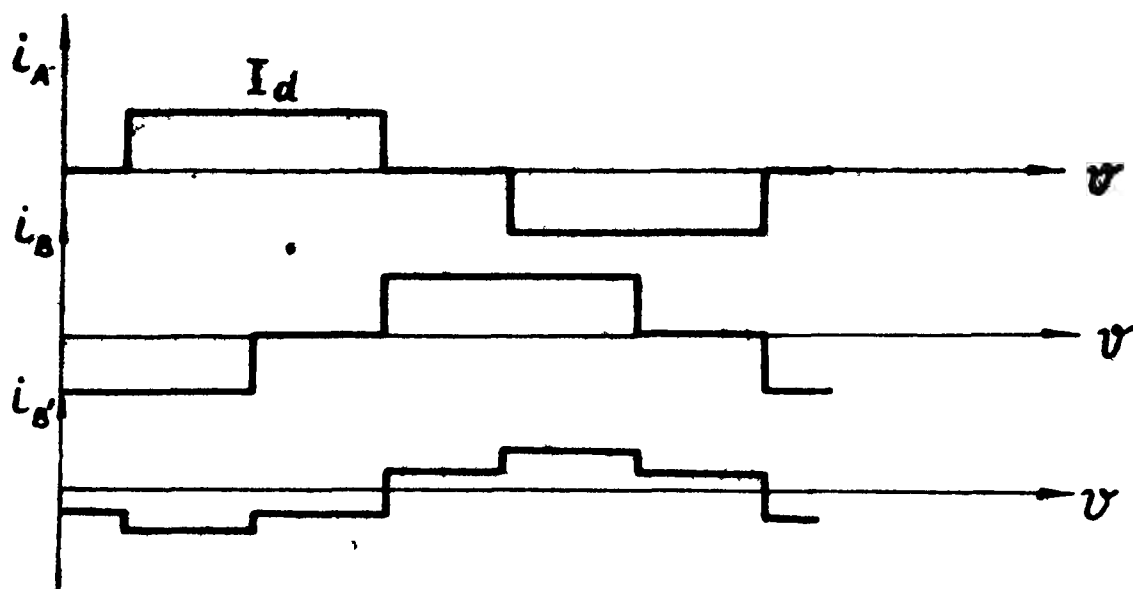
Если в преобразователь включить два трансформатора с разными схемами соединений, то пятая и седьмая гармоники взаимно



Р и с. 4.26. Распределение токов в преобразователе при схеме соединений Y/Δ

компенсируются, хотя останутся некомпенсированными одиннадцатая и тринадцатая гармоники, кратные $\nu = 12k \pm 1$.

На ПП ППТ получили применение два способа компенсации высших гармоник: применение двенадцатифазного режима пре-



Р и с. 4.27. Формы тока в трансформаторе при схеме соединений Y/Δ

образования отмеченным выше способом подключения двух трансформаторов и использование поперечных резонансных фильтров.

Поперечные резонансные фильтры устанавливают на одиннадцатую и тринадцатую гармоники, а более высокие гармони-

ки подавляют одним широкополосным фильтром. Резонансные параллельные фильтры состоят из параллельно соединенных емкости и индуктивности, выбранных из условия:

$$\omega_0^2 LC = 1. \quad (4.29)$$

Применение фильтров высших гармоник увеличивает стоимость преобразовательных подетанций до 15—20%.

Компенсация реактивной мощности преобразователей. Можно показать [2], что угол сдвига φ между полным током преобразователя и его активной составляющей приближенно определяется углами зажигания и коммутации:

$$\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2}. \quad (4.30)$$

Эти углы обычно имеют следующие значения:

- для выпрямителя $\alpha = 5—10^\circ$, $\gamma = 20—25^\circ$;
- для инвертора $\delta = 15—18^\circ$, $\gamma = 20—25^\circ$.

Учитывая, что $\delta = \beta - \gamma$, где β — опережающий угол зажигания, имеем $\varphi_{\text{в}} = 15—22,5^\circ$; $\varphi_{\text{и}} = 25—30^\circ$, откуда следует, что мощность, потребляемая выпрямителем, равна $Q_{\text{в}} = (0,3—0,4)P$, а инвертором $Q_{\text{и}} = (0,45—0,6)P$.

Таким образом, потребление реактивной мощности ПП значительно, что может привести к дефициту реактивной мощности в системе. На ПП устанавливаются поэтому источники реактивной мощности, что удорожает передачу.

Имеются предложения, связанные с применением искусственных схем, существенно снижающих потребление реактивной мощности. Отставание по фазе тока φ определяется тем, что открытие очередного вентиля всегда происходит в зоне правее точки пересечения соответствующих фазных ЭДС, когда напряжение очередной фазы становится больше напряжения фазы, заканчивающей работу. Подобная схема называется естественной.

Уменьшения угла φ можно было бы добиться обеспечением коммутации левее точки пересечения фазных ЭДС. Это достигается введением дополнительной коммутирующей ЭДС, которая поднимает напряжение на очередной фазе до значения, гарантирующего вступление соответствующего вентиля в работу. Способы введения дополнительной ЭДС могут быть следующие: напряжение предварительно заряженного конденсатора, подключение с помощью дополнительных вентилях импульса от дополнительного источника и т. д. Трудности реализации подобных предложений заключаются в том, что она возможна пока только в маломощных преобразователях.

Системы управления тиристорными вентилями. Система электронных устройств управления вентилями расположена на потенциале земли, а вентиль, куда надо передать воздействие, находится под значительным потенциалом. Возникает поэтому сложная задача изоляции системы управления. В современных системах проблема управления решается передачей управляющих импульсов с помощью лазерных, световых или ультразвуковых систем.

Еще одна задача, которую необходимо решить при конструировании систем управления преобразователями, заключается в обеспечении строго синхронной подачи импульсов на группы вентиляей, так как сдвиг в доли микросекунды в подаче импульсов может привести к разрушению вентиляей. Для распределения импульсов по модулям и тиристорным ячейкам используются световоды, ультразвуковые и кабельно-трансформаторные схемы.

Прочие проблемы. Среди других недостатков и трудностей, которые необходимо преодолевать при сооружении и эксплуатации ППТ, отметим следующие.

1. Незначительность сопротивлений тиристоров в открытом состоянии в сочетании с разбросом их характеристик приводит к неравномерности распределения напряжений по отдельным элементам, включенным последовательно.

2. При несимметричных режимах работы электропередачи устойчивость работы инверторов существенно снижается.

3. Усложненная конструкция подстанций из-за обилия тиристоров, конденсаторов, реакторов. Все это не только удорожает подстанцию, но и приводит к снижению надежности ее работы.

4. Трудности борьбы с внутренними перенапряжениями, так как разрядники не могут прервать дугу постоянного тока. Одновременно следует отметить трудности создания выключателей на постоянном токе, так как нужны специальные системы управления, обеспечивающие запираение вентиляей при необходимости отключения передачи.

4.9. Потери мощности

Потери мощности в ППТ определяются следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Delta P = & \Delta P_{Т.В} + \Delta P_{М.В} + \Delta P_{Р.В} + \Delta P_{Л} + \\ & + \Delta P_{Р.И} + \Delta P_{М.И} + \Delta P_{Т.И}, \end{aligned} \quad (4.31)$$

где $\Delta P_{Т.в}$ и $\Delta P_{Т.и}$ — потери в трансформаторах выпрямительной и инверторной подстанций; $\Delta P_{м.в}$ и $\Delta P_{м.и}$ — потери в вентильных мостах; $\Delta P_{р.в}$ и $\Delta P_{р.и}$ — потери в линейных реакторах; $\Delta P_{л}$ — потери мощности в линии.

Потери мощности в трансформаторах определяются обычным образом. Следует только учесть, что переменный ток связан с выпрямленным током линии следующим соотношением [2]:

$$I = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \sqrt{1 - \frac{\gamma}{2\pi}} \quad (4.32)$$

Потери мощности в вентильных мостах выпрямителя и инвертора определяются формулой

$$\Delta P_{м} = \Delta P_{в} + \Delta P_{д.ц} + \Delta P_{а.р}, \quad (4.33)$$

где $\Delta P_{в}$ — потери в вентилях; $\Delta P_{д.ц}$ — потери в демпфирующих цепях; $\Delta P_{а.р}$ — в анодных реакторах.

Потери в вентилях обычно составляют 0,5—0,7% мощности в широком диапазоне возможных режимов. Потери в демпфирующих цепях не зависят от нагрузки и составляют 0,1—0,2% номинальной мощности моста. Потери в анодных реакторах на порядок меньше прочих составляющих потерь.

Потери мощности в линейных реакторах, как и в анодных, определяются потерями в их обмотках от протекания постоянного тока:

$$\Delta P_{л.р} = I_d^2 R_{л.р}, \quad (4.34)$$

где сопротивление реактора определяется по его мощности к.з.

$$R_{л.р} = \Delta P_{к} / I_{но.к.}^2 \quad (4.35)$$

Аналогично определяются потери в линии электропередачи (для двух полюсов)

$$\Delta P_{л} = 2 I_d^2 R_0 l, \quad (4.36)$$

где R_0 — погонное сопротивление полюса; l — длина линии. Потери в линии составляют наибольшую долю суммарных потерь в ППТ.

4.10. Особенности конструктивного исполнения передач постоянного тока

Для воздушных линий постоянного тока применяются одностоечные металлические опоры или опоры на оттяжках. Вес опо-

ры ППТ на 40—45% меньше, чем для ВЛ переменного тока той же пропускной способности. На опоре подвешиваются стале-алюминиевые провода и грозозащитный трос. Однако длина гирлянды изоляторов ППТ несколько больше, так как появление пыли и влаги на изоляторах существенно увеличивает неравномерность распределения напряжения по гирлянде. Это связано с тем, что в ППТ распределение напряжения по гирлянде определяется сопротивлениями утечки, а не емкостями изоляторов, как в линиях переменного тока. Тем не менее с учетом того, что у ППТ два полюса против трех фаз линии переменного тока, суммарный расход изоляторов для ППТ несколько ниже.

Для ВЛ ППТ повышенного напряжения для снижения потерь на корону применяется расщепление проводов.

Следует отметить, что кабельная линия на постоянном токе значительно дешевле аналогичной линии на переменном токе. Условия работы кабеля более благоприятны и электрическая прочность кабеля в 2—3 раза выше. Старение изоляции кабеля на постоянном токе происходит медленнее из-за отсутствия частичных разрядов в изоляции.

Количество мостов в ПП определяется мощностью и напряжением ППТ. Число мостов в каждом полюсе обычно четное для обеспечения двенадцатифазного режима. Мосты подключаются последовательно или последовательно-параллельно. Каждый мост подключается через разъединители и снабжен шунтирующим аппаратом, включающимся при его выводе из работы. Для защиты от перенапряжений в цепях моста ставятся разрядники.

На выходе подстанции в линию постоянного тока включаются линейные реакторы для сглаживания пульсаций выпрямленного тока и защиты подстанций от перенапряжений со стороны линии. Индуктивность реакторов около 1 Гн. От перенапряжений линейные реакторы также защищены разрядниками.

Наиболее важным элементом ППТ является вентиль. До 1970-х годов на ПП использовались ртутные вентили, имеющие низкую надежность и плохие экологические характеристики. Высоковольтные тиристорные вентили (ВТВ), в отличие от ртутных, можно создать практически на любые напряжения и значительно повысить с их помощью надежность.

При применении ВТВ можно поместить тиристоры и часть оборудования (реакторы, разрядники, шунтирующие цепочки) в одну оболочку, заполненную маслом или элегазом, что унифицирует и удешевляет подстанцию. Системы управления ВТВ

значительно проще, никаких ограничений на скорость изменения нагрузки не требуется. В то же время надо отметить, что ВТВ имеют меньшую перегрузочную способность как по току, так и по напряжению, а потери в них выше, чем в ртутных вентилях.

Вентили для современных крупных ППТ рассчитываются на пропускание тока силой в несколько килоампер и должны выдерживать рабочие напряжения в сотни киловольт. В то же время рабочие параметры отдельных тиристоров, достигнутые к настоящему времени, составляют до 2—3 кА и 3—4 кВ. В ВТВ применяется поэтому последовательно-параллельное соединение тиристоров. При создании ВВТ используется блочный принцип, когда тиристоры объединяются в так называемые тиристорные ячейки и их группы-модули. Каждый модуль представляет собой законченный вентиль со всеми устройствами управления, но рассчитанный на напряжение, меньшее, чем ППТ. Модули легко заменяются при необходимости. Тиристорные ячейки внутри модуля также легко заменяются. В модуль встраивается единый для всех ячеек блок управления.

Охлаждение тиристоров обычно применяется водяное, а иногда — воздушное, принудительное.

Избыточность изготовления ВТВ приводит к тому, что выход из строя 10—15% тиристоров не влияет на работоспособность всего ВТВ.

Для размещения оборудования ПП применяют закрытые распределительные устройства, хотя имеются и открытые подстанции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров Г. Н. Передача электрической энергии переменным током. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 176 с.
2. Веников В. А., Рыжов Ю. П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока: Учеб пособие. М.: Энергоатомиздат, 1985. 272 с.
3. Тиходеев Н. Н. Передача электрической энергии. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 248 с.
4. Электропередачи и вставки постоянного тока в Единой энергосистеме СССР/Шидловский А. К., Перхач В. С., Лазарев Н. С. и др. Киев: ИЭД, 1988. 51 с.
5. Глухарев О. А., Новелла В. Н. Аварийные режимы электропередач постоянного тока. М.: МЭИ. 1989. 70 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Общая характеристика дальних электропередач	4
1.1. Энергетическая характеристика дальних электропередач	4
1.2. Техничко-экономическое сопоставление передач переменного и постоянного тока	7
1.3. Экологические факторы и безопасность передачи электроэнер- гии по линиям высокого напряжения	10
Глава 2. Электрические параметры и уравнения длинной линии пере- менного тока	12
2.1. Первичные и вторичные параметры четырехполюсника	12
2.2. Длинная линия как цепь элементарных четырехполюсников	15
2.3. Параметры реальных дальних электропередач	17
2.4. Линия без потерь активной мощности (идеальная линия)	20
2.5. Активная и реактивная мощность передачи при регулировании напряжения в ее начале и конце	25
Глава 3. Режимы и повышение пропускной способности дальних пере- дач переменного тока	29
3.1. Особенности линий длиной в четверть волны. Компенсирован- ные электропередачи	29
3.2. Особенности линии длиной в половину волны. Настроенные электропередачи	34
3.3. Автоматическая аварийная разгрузка и переключательные пункты дальних электропередач	37
3.4. Схема дальней передачи переменного тока	40
3.5. Повышение пропускной способности электропередач при помо- щи регулируемых источников реактивной мощности	42
Глава 4. Передача энергии постоянным током	46
4.1. Историческая справка о передачах постоянного тока и встав- ках постоянного тока, перспективы их распространения	46
4.2. Схемы передач постоянного тока	47
4.3. Уравнения трехфазной мостовой преобразовательной схемы	53
4.4. Режим малых токов	57
4.5. Режим рабочих токов	60
4.6. Инверторный режим преобразователя	63
4.7. Регулирование работы передач постоянного тока	67
4.8. Проблемы передач постоянного тока	71
4.9. Потери мощности	75
4.10. Особенности конструктивного исполнения передач постоянно- го тока	76
Библиографический список	78

Светлана Семеновна Ананичева
Петр Иванович Бартоломей
Анатолий Леонидович Мызин

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ

Редактор издательства З. Н. Крамаренко
Технический редактор Л. П. Лезина
Корректор О. С. Смирнова

ЛР № 020315 от 28.11.91 г.

Сдано в набор 06.04.93	Подписано в печать 12.11.93	Формат 60×90 ^{1/16}
Бумага типографская	Высокая печать	Усл. п. л. 5,0
Усл. кр.-отт. 5,2	Тираж 500	Уч.-изд. л. 4,5
		Заказ 135

Редакционно-издательский отдел
Уральского государственного технического университета — УПИ
620002, Екатеринбург, Мира, 19, 8-й учебный корпус
Цех № 1 АО «Полиграфист»
620002, Екатеринбург, Мамина-Сибиряка, 145

**С. С. АНАНИЧЕВА
П. И. БАРТОЛОМЕЙ
А. Л. МЫЗИН**

**ПЕРЕДАЧА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
НА ДАЛЬНИЕ
РАССТОЯНИЯ**

